

Kopplung von PROFIBUS - Systemen über ATM

Vom Fachbereich für Mathematik und Informatik der Technischen
Universität Braunschweig genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

von

Dipl.-Inf. Oliver Kunert

Datum der Promotion: 17.12.1999

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund der Technischen Universität Braunschweig.

Der Leiterin der Arbeitsgruppe Hochleistungskommunikation und multimediale Systeme und gleichzeitig meiner Mentorin Frau Prof. Dr. Martina Zitterbart möchte ich dafür danken, daß sie meine Arbeit betreut und deren Durchführung in ihrer Forschungsgruppe ermöglicht hat. Ihre fachliche Förderung trug maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Wichtige Motivationen waren die von ihr unterstützten Besuche von Tagungen und die Industriekontakte.

Weiterer Dank gebührt Herrn Prof. Dr. Torsten Braun (Universität Bern) für die freundliche Übernahme der Zweitgutachterfunktion.

Auch durch Anregungen und die kritische Auseinandersetzung mit der Thematik dieser Arbeit im Kollegenkreis während der Mitarbeiter- und Diplomandenseminare und darüber hinaus erfuhr meine Tätigkeit wertvolle Impulse. Für die angenehme und förderliche Zusammenarbeit möchte ich mich bei meinen Kollegen bedanken.

Die Inspiration zur Bearbeitung der Thematik ging vom Institut für Automation und Kommunikation (IFAK) in Barleben aus, dessen Mitarbeiter Herr Dr. Jörg Hähnliche und Herr Axel Pöschmann die Entwicklung der Kopplungskonzepte über weite Phasen ratgebend und kritisch begleitet haben.

Meine Vorbereitung auf die Promotion wurde durch die Friedrich-Naumann-Stiftung, zu deren Stipendiatenkreis ich gehörte, mit Mitteln des Ministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Durch Herrn Prof. Dr. Karl-Heinz Paqué (Universität Magdeburg), unter dessen Leitung Diskussionsrunden der regionalen Stipendiaten standen und durch den interdisziplinären Gedankenaustausch zwischen den Mitstipendiaten wurde mir der Blick für das Geschehen über das eigene Fachgebiet hinaus offengehalten, der bisweilen durch die vertiefte Arbeit an der Thematik zu gering ausfiel.

Nicht zuletzt sei allen in meinem persönlichen Umfeld für ihre Toleranz und Unterstützung gedankt. Besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mich in jeder Situation förderten und mir, wie zugleich Daniela auch in schwierigen Phasen den nötigen Rückenhalt gegeben haben.

Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG.....	1
1.1	PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION	1
1.2	ZIELE UND LÖSUNGSANSÄTZE.....	3
1.3	ÜBERSICHT ÜBER DIE ARBEIT	5
2	GRUNDLAGEN	7
2.1	INDUSTRIELLE KOMMUNIKATION IM FELDBEREICH.....	7
2.2	FELDBUSSYSTEME	9
2.2.1	Architektur und Vergleich mit anderen Kommunikationssystemen.....	9
2.2.2	Einsatzbereiche von Feldbussystemen.....	10
2.2.3	Varianten von Feldbussystemen	11
2.3	PROFIBUS	12
2.3.1	Übertragungstechnik	14
2.3.2	Buszugriffs- und Übertragungsprotokoll	14
2.3.2.1	Token-Verwaltung und Token-Weitergabe.....	15
2.3.2.2	Initialisierung des logischen Token-Rings	16
2.3.2.3	Prioritäten	16
2.3.2.4	Azyklischer Send- / Requestbetrieb	16
2.3.2.5	Zyklischer Send- / Requestbetrieb.....	16
2.3.2.6	Systemzeiten und Überwachungszeiten	17
2.3.2.7	Zyklus- und Systemreaktionszeiten.....	18
2.3.2.8	Fehlerbehandlung	20
2.3.2.9	Telegrammaufbau und Telegrammformate	20
2.3.3	Schnittstelle zur Anwendungsschicht	21
2.3.4	PROFIBUS-Anwendungsschicht.....	21
2.4	WEITVERKEHRSNETZE, BACKBONE-NETZE UND ATM.....	23
2.4.1	Der Asynchrone Transfermodus (ATM).....	23
2.4.2	ATM-Referenzmodell.....	25
2.4.3	Die physikalische Schicht	25
2.4.4	Die ATM-Schicht.....	26
2.4.5	Die Adaptionsschicht	29
2.4.6	ATM-Vermittlungstechnik	33
2.4.7	Signalisierung	34
2.4.8	Mehrpunktkommunikation in ATM-Netzen.....	35
2.4.9	Zusammenfassung der Vorteile von ATM	35
2.5	AKTUELLE ENTWICKLUNGEN IM BEREICH DES PROFIBUS	36
2.6	VLANS	42
3	KONZEPTE ZUR KOPPLUNG VON PROFIBUSSEN	45
3.1	VORAUSBETRACHTUNGEN FÜR DEN ENTWURF DER KOPPLUNGSMODELLE.....	45
3.2	MÖGLICHKEITEN DER KOPPLUNG.....	46
3.3	ZWISCHENSYSTEME ZUR KOPPLUNG.....	50
3.4	ALLGEMEINE KOPPLUNGSPRINZIPIEN	52

3.5	MODELLANSATZ ZUR TRANSPARENTEN VERBINDUNG VON PROFIBUS-SEGMENTEN	54
3.6	MODELLANSATZ ZUR VERBINDUNG UNABHÄNGIGER PROFIBUSSE	55
3.7	QUALITÄTEN DES ÜBERMITTLUNGSDIENSTES	56
3.7.1	Analyse des Kommunikationsverhaltens von PROFIBUS	57
3.7.2	Abbildung der PROFIBUS Kommunikationscharakteristik auf ATM-Dienstqualitäten	59
3.7.3	Verzögerungen durch ATM	62
3.7.4	Übertragungsfehler und Zellverluste in ATM	63
3.7.5	Fehlerbehandlung	64
3.8	UMSETZUNGSMODI ZWISCHEN TELEGRAMMEN UND ZELLEN	67
3.8.1	Blockmodus	67
3.8.2	Strom-Modus	69
4	TRANSPARENTES PROFIBUS-BRIDGING	73
4.1	SYSTEMBESCHREIBUNG	73
4.2	FUNKTION DER BRÜCKE	73
4.3	AUSWIRKUNGEN DER KOPPLUNG AUF DAS ECHTZEITVERHALTEN UND VERHALTEN BEI FEHLERN	76
4.3.1	Token-Verwaltung	77
4.3.2	Echtzeitverhalten	77
4.3.3	PROFIBUS Systemzeiten	77
4.4	SIMULATIONEN ZUM TRANSPARENTEN PROFIBUS-BRIDGING	81
4.4.1	Simulationswerkzeug BONEs Designer	81
4.4.2	Beschreibung des verwendeten Modells	84
4.4.3	Basissystem zur Simulation	84
4.4.4	Auswirkungen von Zellverlusten	85
4.4.5	Untersuchung der Auswirkungen von Interferenzdatenverkehr	87
4.4.5.1	Vorbetrachtungen	87
4.4.5.2	Simulationsszenario	88
4.4.5.3	Rückwirkungen auf die PROFIBUS Parametrierung	93
4.4.5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulationen	95
4.5	BEWERTUNG DES KOPPLUNGSANSATZES	95
4.5.1	Einsatzgrenzen des Kopplungsansatzes	95
4.5.2	Entwurfskriterien eines transparent gekoppelten PROFIBUS Systems	96
5	KOPPLUNG VON UNABHÄNGIGEN PROFIBUS-SEGMENTEN	101
5.1	SYSTEMBESCHREIBUNG	101
5.2	TOKENVERWALTUNG	103
5.3	AUFGABEN UND FUNKTION DER BRÜCKEN	103
5.3.1	Architektur	103
5.3.2	Filterung und Weiterleitung	104
5.3.3	Kommunikationsverhalten	107
5.3.4	Fehlererkennung und Fehlerbehebung	107
5.4	ERWEITERTE ADRESSIERUNG	108
5.4.1	Nutzung der PROFIBUS Adreßerweiterung	108
5.4.2	Segmentierung unter Verwendung von Adreßbereichen	109
5.5	AUSWIRKUNGEN DER KOPPLUNG AUF DAS SYSTEMVERHALTEN	110
5.5.1	Echtzeitverhalten	111
5.5.2	Deadlock-Situationen	113

5.5.2.1	Vermeidung von Deadlock-Situationen	114
5.5.2.2	Erkennung und Auflösung von Deadlock-Situationen	116
5.5.3	Auswirkungen auf die Systemzeiten	117
5.5.4	Parametrierung	117
5.5.5	Geeignete Segmentierung von PROFIBUS	119
5.6	ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DES KOPPLUNGSANSATZES	119
5.7	ZUSAMMENSCHALTUNG VON PROFIBUS-SEGMENTEN AM BEISPIEL DER STELLWERKSKOMMUNIKATION	120
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	131

Anhang A: Simulationsmodelle und –komponenten

Anhang B: Übersicht zu Terminologie und Parametern des PROFIBUS

Abkürzungsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Der gesamtgesellschaftliche Wandel hin zu einer Informationsgesellschaft wurde induziert von der sich rasant entwickelnden Kommunikationstechnik als Grundlage des Internet. Anwendungen wie Web-Browsing wurde dadurch zum Durchbruch und zu nachhaltigem Wachstum verholfen. In der Konsequenz verlangt die explosionsartig steigende Anzahl der Nutzer wiederum nach leistungsfähiger Infrastruktur. Die vorhandenen Basistechnologien gilt es nun durch weitere sinnvolle Anwendungen zu ergänzen und schließlich in viele Bereiche des täglichen Lebens einzuführen. Ein Bereich, in dem erst in jüngster Zeit die Vorzüge einer leistungsfähigen Kommunikationstechnik voll ausgeschöpft werden können, ist die industrielle Kommunikation [Neum99]. Die Steuerung und Überwachung von Produktionsanlagen, Automatisierung von Bürogebäuden bis hin zu Wohnhäusern und die Verkehrstechnik zählen hierbei zu den Hauptanwendungsfeldern für Kommunikationssysteme, die speziell auf die dortigen Anforderungen zugeschnitten sind. Bezogen z.B. auf ein Industrieunternehmen kann die Kommunikation in der Form eines hierarchisch strukturierten Ebenenmodells mit den Elementen Unternehmensleitebene, Produktionsleitebene, Prozeßleitebene und Feldebene beschrieben werden. Während in der Unternehmensleitebene die strategischen Funktionen zur Führung eines Unternehmens ausgeführt werden, ist die Lenkung von Produktionsabläufen Gegenstand der Produktionsleitebene. Im Bereich der Prozeßebene erfolgt die Umsetzung der Produktionsaufträge. Die Feldebene beinhaltet die zur Erfüllung der Produktionsaufträge erforderlichen Geräte, sowie Komponenten zur Beeinflussung von Prozeßgrößen. Die Ausführung der beschriebenen Aufgaben wird dabei in den Ebenen von unterschiedlichen Kommunikationssystemen unterstützt. Dies resultiert aus den differenzierten Anforderungen, welche die Kommunikation innerhalb einer Ebene zu erfüllen hat. So entstanden speziell auf die Feldebene bzw. Sensor-/Aktorebene zugeschnittene Systeme, die sich zu den LANs zählen lassen, sich aber hinsichtlich Latenzzeit, Nachrichtenrate, Nachrichtenlänge, Protokoll-Funktionalität, Datensicherheit, Anzahl Teilnehmer und Gerätekosten von diesen abgrenzen. Zur Sicherstellung des Informationsflusses im Unternehmen ist insbesondere die Kommunikation zwischen den Ebenen erforderlich. Aufgrund der bereits angedeuteten stark differierenden Eigenschaften der Systeme innerhalb der einzelnen Ebenen ist kein durchgängiges System vorhanden, sondern es muß auf die Funktionalität von Gateways, zurückgegriffen werden.

Das Aufkommen hochleistungsfähiger Kommunikationssysteme, wie des Transfersystems ATM (Asynchroner Übertragungsmodus), gestattet über eine Erweiterung der Anwendungsbereiche von Feldbussystemen nachzudenken. Durch seine Fähigkeit, Datenströme unterschiedlicher Charakteristik integrieren zu können, zeichnet sich ATM besonders aus. Ein weiteres signifikantes Kriterium ist die Möglichkeit der Zuordnung von Dienstgütern zu Verbindungen und deren garantierte Einhaltung auf der Basis eines zu Beginn der Übertragung abgeschlossenen Vertrages. Daneben steht die Variabilität, die ATM sowohl für den lokalen Bereich als auch für den Bereich der Wide Area Networks tauglich macht. Und schließlich

stellt der Asynchrone Übertragungsmodus Datenraten bis in den Gigabitbereich zur Verfügung. Die Summe dessen gibt den Ausschlag dazu, diese Technik auch unter dem Blickwinkel des Einsatzes als Koppel- oder Verteilnetz im Feldbereich zu untersuchen. Zwei Anwendungsfälle sind dabei denkbar. Zum einen können bisher autark operierende Feldbusse durch Zwischenschaltung von ATM verbunden und damit Inseln verknüpft werden. Gleichzeitig ist dies verbunden mit einem Ausbruch aus der lokalen Eindämmung, der heutige Feldbussysteme unterliegen, womit sich zwangsläufig neue Anwendungsgebiete ergeben. Zum anderen macht ATM die Integration von Multimedia möglich, die bisher nur unter Inkaufnahme großer Einschränkungen realisiert werden konnte. In solchen Anwendungen, in denen eine Echtzeit-Prozeßvisualisierung erforderlich ist, können nunmehr Systemverhalten und Systemzustände akustisch und visuell verfolgt werden. Ferndiagnose und Fernwartung werden somit stark vereinfacht.

Bei der Einführung von ATM wurde diese Technik euphorisch begrüßt und der potentielle Einsatz in fast allen Bereichen der Vernetzung vorausgesehen. Zum heutigen Zeitpunkt hat die ATM-Technik einen Einsatzschwerpunkt im Weitverkehrsbereich gefunden sieht sich hier aber auch wachsender Konkurrenz durch IP direkt über SDH (Synchronous Digital Hierarchy) und WDM (Wavelength Division Multiplexing) gegenüber. Eine partielle Durchdringung hat ATM im Backbone-Bereich (Campus- bzw. Standortbereich) erlangt. Bei den direkten Teilnehmeranschlüssen werden aber weiterhin die verbesserten LAN-Technologien dominieren. Aus der Sicht der Automatisierungstechnik besteht unter anderem die Forderung nach preiswerten Komponenten. In Anbetracht aktueller Preise für ATM-Komponenten wird dieser Forderung gegenwärtig nicht in erwartetem Maße entsprochen. Tendenziell sind jedoch fallende Preise zu beobachten und gleichzeitig gibt es Anstrengungen einfach ausgestattete und damit preiswertere ATM-Komponenten für spezielle Einsatzzwecke zu entwickeln.

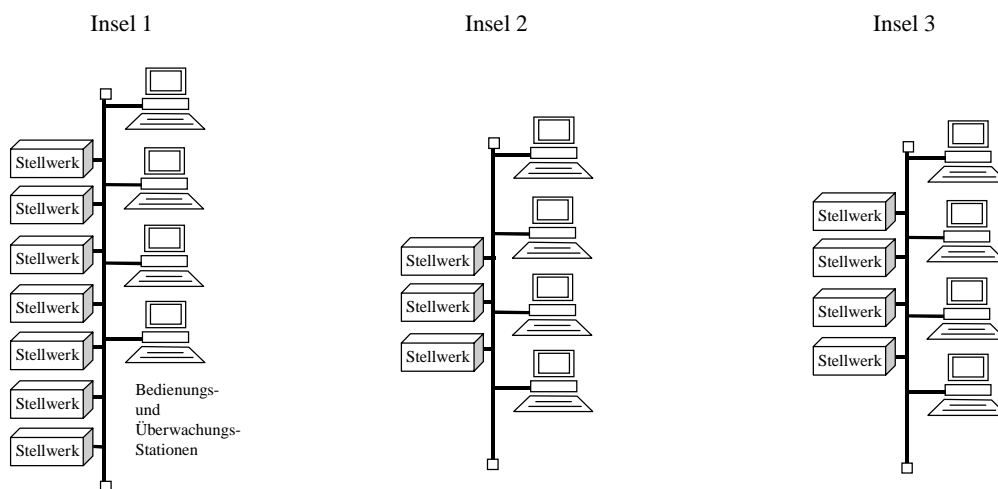


Abbildung 1: Isolierte PROFIBUS-Inseln, nur lokale Bedienung und Überwachung

Zur Verdeutlichung der Problematik der Inselbildung bei Automatisierungssystemen und den damit einhergehenden Nachteilen bei der Parametrierung, der Verwaltung und im laufenden Betrieb soll folgendes Beispiel aus dem Bereich der Verkehrstechnik herangezogen werden. Ein Unternehmen hat eine Gleisanlage mit elektronischer Zuglenkung basierend auf einer Anzahl von 14 Stellwerken und zugehörigen Bediencomputern automatisiert. Abbildung 1 zeigt die Konstellation. Die Stellwerksrechner zur Steuerung von Weichen sind auf ein Areal

mit einer Ausdehnung von etwa 50 km verteilt. Durch räumliche Nähe zueinander und koordinierbare Funktionen lassen sich die Stellwerke zu drei Einheiten zusammenfassen. Diese drei Einheiten bilden je ein PROFIBUS-Segment zusammen mit jeweils einer Anzahl von Bediencomputern. Die PROFIBUS-Kommunikation zwischen diesen drei Segmenten ist bedingt durch die Ausdehnung nicht möglich. In dieser Situation ist es wünschenswert, die Bediencomputer in einer Zentrale zusammenzufassen und zukünftig von dort aus auf jedes Stellwerkssegment zugreifen zu können, um Parametrierungs- und Überwachungsfunktionen auszuführen.

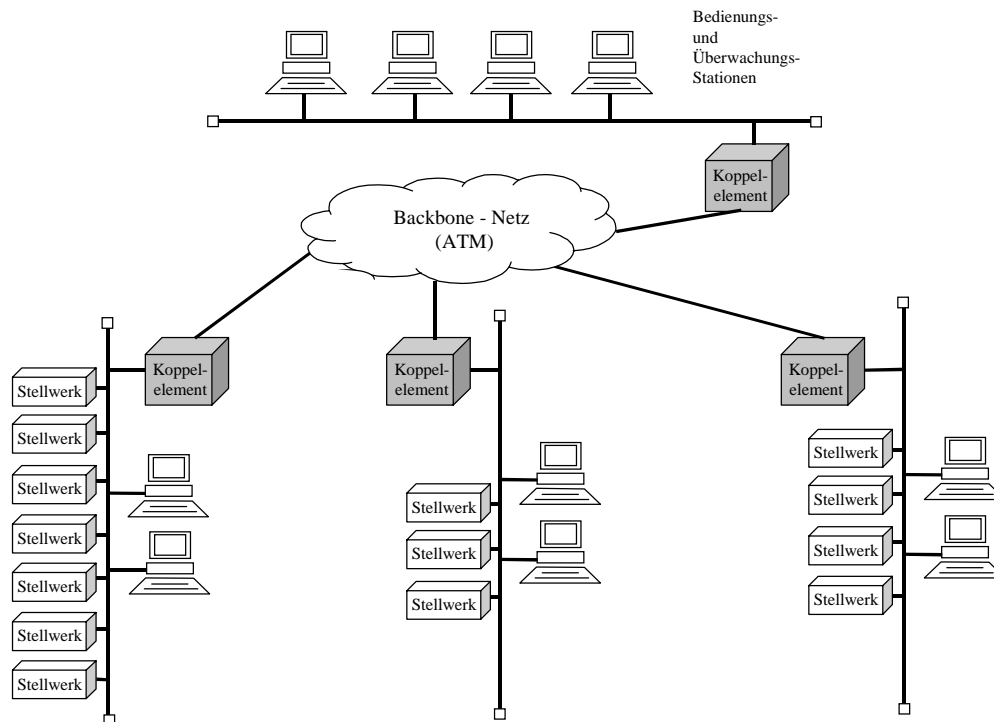


Abbildung 2: Verbundene PROFIBUS-Inseln, zentrale Bedienung und Überwachung

Offensichtlich ergeben sich für das betroffene Unternehmen durch die Zusammenschaltung der PROFIBUS-Inseln Managementvorteile, die sich in leichterem Aufspielen von Software, aufwandsärmerer Wartung sowie in einer zentralen Sicht auf das Gesamtgeschehen niederschlägt.

1.2 Ziele und Lösungsansätze

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Konzepten zur Verbindung von PROFIBUS-Systemen über ATM. Ein eigenständiges PROFIBUS-System wird auch als Segment bezeichnet. Die Beschränkung der Ausdehnung und der Anzahl pro Segment anzuschließender Teilnehmer stellen Engpässe bei derzeit implementierten PROFIBUS-Systemen dar und führen zur Existenz von untereinander nicht verbundenen Feldbusinseln. Hinsichtlich der Parametrierung, Steuerung und Wartung solcher aus mehreren Segmenten bestehender Systeme ist diese Situation unbefriedigend. Einen Ausweg bietet die Verbindung der PROFIBUS-Inseln über ATM, dessen hervorstechendstes Merkmal die umfangreiche Unterstützung von Dienstqualitäten auf Verbindungsebene ist.

Im Mittelpunkt der Arbeit stehen zwei Lösungsansätze zur Verbindung von PROFIBUS über ATM, die in Kapitel 3 vorgestellt werden. Eine große Rolle kommt den PROFIBUS-ATM-Koppelementen zu. Deren zu erbringende Funktionalität wird ermittelt und auf die Kopplungsansätze zugeschnitten.

Die grundsätzliche Zielstellung ergibt sich aus den Eigenschaften der PROFIBUS-Kommunikation. Harte zeitliche Anforderungen an die Abwicklung der Datenübertragung müssen auch in einem über ATM gekoppelten PROFIBUS-System erfüllt werden. Das bedeutet einerseits die Bestrebung, zusätzliche Verzögerungen möglichst zu vermeiden und andererseits die Zielstellung, nur geringstmögliche Verluste tolerieren zu wollen.

Dem ersten Lösungsansatz liegt die aus der Sicht der PROFIBUS-Teilnehmer transparente Kopplung über ATM zugrunde. Die Grundcharakteristik hiervon ist, daß zwei oder mehr bisher dedizierte Segmente mittels der Kopplung zu einem Segment zusammengefaßt werden. Der Adreßraum erstreckt sich über das gesamte System. Die Intention dieses Ansatzes ist die Erweiterung der maximalen Ausdehnung von PROFIBUS-Segmenten, wobei zur Überbrückung der Distanzen das ATM-Netz dient. Die Koppelemente sorgen für die Umsetzung der PROFIBUS-Rahmen in ATM-Zellen und umgekehrt. Abbildung 3 zeigt entsprechend dem grundsätzlichen Konzept drei über ein ATM-Netz verbundene PROFIBUS-Segmente. Das ATM-Netz wird von drei Switches gebildet, welche dediziert mit der Verbindung der PROFIBUS-Segmente betraut sind. Prinzipiell kann das ATM-Netz jede Ausprägung annehmen und weitere nicht aus dem Feldbusbereich stammende Endgeräte können angeschlossen sein, die unabhängig vom PROFIBUS-Datenaustausch kommunizieren können. Netzübergänge zu anderen Systemen sind nicht ausgeschlossen

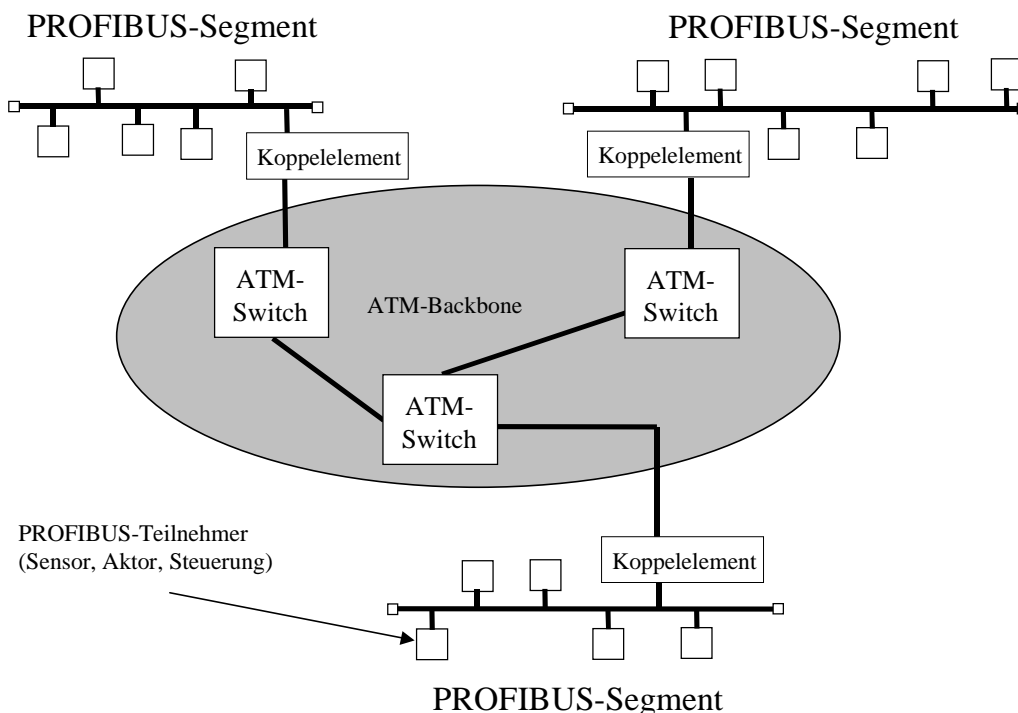


Abbildung 3: PROFIBUS-Segmente über ATM verbunden

Dem zweiten Lösungsansatz liegt die Verbindung von PROFIBUS-Inseln zugrunde. Eigenständig operierende PROFIBUS-Systeme werden hier, vergleichbar mit der Verbindung von LAN-Segmenten, über ein Backbone-Netz verbunden. Koppellemente haben hier zusätzliche Funktionen, wie z.B. das Filtern, wahrzunehmen. Der ursprünglichen Forderung, von einer Leitstation aus auf verschiedene PROFIBUS-Segmente zugreifen zu können, diese zu parametrieren und zu überwachen, kann hiermit entsprochen werden. Bei diesem Ansatz wird neben der Überbrückung größerer Distanzen auch die Lasttrennung ermöglicht. Abhängig von dem Kommunikationsverhalten der anzuschließenden PROFIBUS-Geräte können diese so zu einzelnen Segmenten zusammengefaßt werden, daß die Busbelastungen reduziert werden, was wiederum positive Auswirkungen auf die Reaktionszeiten haben kann. Dennoch kann segmentübergreifend kommuniziert werden.

ATM gestattet es Anwendungen, differenzierte Dienstqualitäten anzufordern. Einen weiteren Kernpunkt dieser Arbeit bildet die Abbildung der von PROFIBUS verlangten Dienstqualitäten auf die von ATM gebotenen Mittel. Dem voraus geht eine Analyse des Kommunikationsverhaltens bei PROFIBUS. Die Wahl geeigneter Dienstqualitätsparameter hat zum Ziel, den Transport von PROFIBUS-Rahmen durch das ATM-Netz einerseits aus der PROFIBUS-Sicht auf effiziente Weise zu realisieren, andererseits aber ressourcenschonend abzuwickeln. Die Zielstellung resultiert daraus, daß ATM in der Lage ist, gleichzeitig weitere Datenströme zu transportieren. Diese Fähigkeit soll nicht eingeschränkt werden.

Die Verbindung von PROFIBUS-Segmenten über ATM bleibt nicht rückwirkungsfrei auf die Kommunikation zwischen den PROFIBUS-Geräten. In erster Linie ist hiervon die Parametrierung der PROFIBUS-Systeme betroffen. Diese Implikationen für den Entwurf von PROFIBUS-Systemen werden untersucht und eine Vorgehensweise entwickelt, mittels derer die Parametrierung von gekoppelten Systemen optimiert werden kann.

Im optimalen Falle sollte der Investitionsschutz gewahrt bleiben, d.h. bisher verwendete PROFIBUS-Komponenten sollen ohne Änderungen an der Software auch in gekoppelten Systemen eingesetzt werden können. Grundsätzlich stellt der Investitionsschutz aber kein Ausschlusskriterium dar. Es werden folglich erst Untersuchungen angestellt, wie weit die Koppelungsansätze ohne Änderungen der PROFIBUS-Protokolle entworfen werden können, bevor eventuelle Erweiterungen des Standards vorgeschlagen und analysiert werden.

1.3 Übersicht über die Arbeit

Exemplarisch für die breite Palette der Feldbusse wurde der PROFIBUS ausgewählt. Die Konzentration auf PROFIBUS resultiert einerseits aus seiner dominierenden Stellung am deutschen und am internationalen Markt und andererseits aus seinem Status als Teil der Europäischen Norm EN50170, welche auf seine zunehmende Akzeptanz zurückzuführen ist und sich in einem Marktanteil von 48 % der Installationen niederschlägt. Diese Stellung leitet sich wiederum aus seiner Flexibilität und seiner potentiellen Eignung für eine Vielzahl von Einsatzbereichen her.

Kapitel zwei gibt überblicksartig eine Einordnung der Feldbusse in den Kontext der Kommunikationssysteme wieder, zeigt die Einsatzbereiche und deutet Grenzen der Leistungsfähigkeit an. Besonderer Wert wurde bei der Standardisierung von PROFIBUS auf die vom Kommunikationssystem zu erfüllenden Leistungsanforderungen der Feldbusapplikationen gelegt, wobei PROFIBUS ein breites Spektrum bedienen kann. Ebenfalls im zweiten Kapitel werden die

charakteristischen Eigenschaften des Asynchronen Transfermodus herausgestellt und die besondere Eignung von ATM im Sinne der Aufgabenstellung unterstrichen. Darüber hinaus werden im zweiten Kapitel aktuelle Entwicklungen im Bereich des PROFIBUS diskutiert und eine Abgrenzung der bearbeiteten Thematik zur Einbringung von Ethernet in die Automatisierungstechnik vorgenommen. Im dritten Kapitel werden die zwei Kopplungsmodelle vorgestellt, welche Gegenstand für weitere Untersuchungen sind. Darüber hinaus gibt Kapitel drei detailliert Auskunft über die Brücken, die als Kopplungselemente eingesetzt werden und geht auf die Abbildung der von PROFIBUS geforderten Dienstqualität auf die Dienstklassen von ATM und deren Parameter ein. Schließlich werden in den Kapiteln vier und fünf das Modell zur transparenten Kopplung von PROFIBUS-Teilsegmenten und das Modell zur Kopplung unabhängiger PROFIBUS-Segmente detailliert beschrieben. In beiden Kapiteln werden zuerst die Basisfunktionalitäten der Brücken erläutert, anschließend die Implikationen welche die Kopplung auf das Echtzeitverhalten ausübt diskutiert und schließlich wird die grundsätzliche Funktion beider Modelle anhand von umfangreichen Simulationen gezeigt. Wichtigste Eigenschaften eines auf gekoppelten Segmenten basierenden PROFIBUS bleiben die Vorhersagbarkeit der Dauer von Nachrichtenzyklen und die Fähigkeit des Datenaustauschs unter harten Zeitanforderungen. Auf diese Aspekte wird ebenfalls auf der Basis von Simulationen zu einem realen Anwendungsfall eingegangen.

2 Grundlagen

2.1 Industrielle Kommunikation im Feldbereich

Kommunikationsstrukturen in der Automatisierungstechnik

Ein technischer Prozeß kann als die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen eines Systems, durch welche Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird, verstanden werden [Schu99].

Zustandsgrößen technischer Prozesse werden als physikalische Größen erfaßt. Mittels geeigneter optischer Darstellungen müssen diese dann in eine vom Bediener interpretierbare Form gebracht werden. Prozeß und Prozeßsteuerung sind oft räumlich getrennt angeordnet. In allen Bereichen der produzierenden und verarbeitenden Industrie, aber auch im Verkehrsbereich nehmen Steuerungs- und Regelungsaufgaben einen Hauptteil der zu bewältigenden Aufgaben ein. Aufgrund von Zustandsdaten und einem Vergleich mit gewünschten Werten werden Entscheidungen für weiteres Vorgehen getroffen.

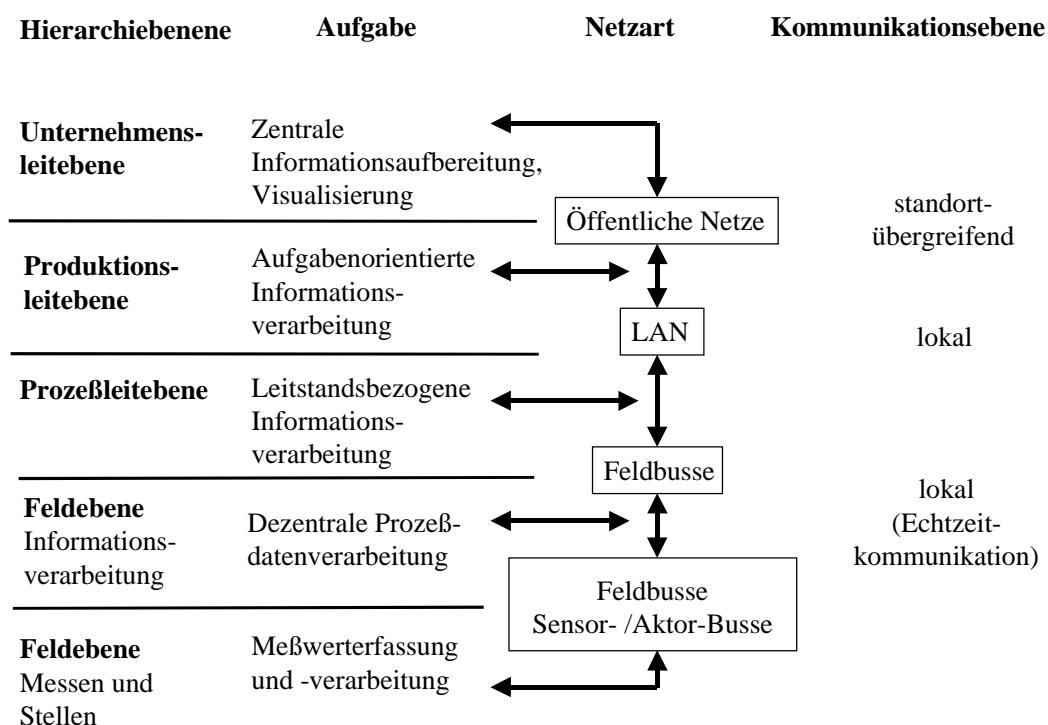


Abbildung 4: Hierarchieebenen der Unternehmenskommunikation

Der Informationsfluß in einem Unternehmen kann von sehr komplexer Natur sein. Er reicht vom Transport einzelner Bytes von Prozeßgrößen in der Feldebene bis hin zum Austausch multimedial aufgebauter Geschäftsberichte in der Unternehmensleitebene. Zur aufgabenbezo-

genen Abgrenzung wird versucht, die informationsverarbeitenden Instanzen in Schichten zu unterteilen, woraus ein hierarchisches Ebenenmodell entsprechend Abbildung 4 entsteht [Schn99].

Typisch für die einzelnen Ebenen ist, daß die jeweiligen Planungs- und Steuerungsaufgaben mit unterschiedlichen Zeithorizonten durchgeführt werden. Je näher die Betrachtung am Produktionsprozeß liegt, um so zeitkritischer werden Reaktionszeiten. Im Gegensatz dazu nimmt der Umfang der in die Entscheidung einzubeziehenden Daten mit dem Abstraktionsgrad vom Prozeß zu.

- **Unternehmensleitebene:** Die Unternehmensleitebene legt langfristig die Ziele des Unternehmens fest. Dem Management müssen hierzu geeignete Informationen zur Visualisierung wesentlicher Kennzahlen übergeben werden, die mit Hilfe betriebswirtschaftlicher Methoden bearbeitet werden können. Im Ergebnis dessen werden z.B. Absatzplanungen und Strategien festgelegt. Die Kommunikation zwischen einzelnen Standorten des Unternehmens geschieht auf der Basis von Weitverkehrsnetzen. Das Volumen der auszutauschenden Daten geht hier bis in den Bereich von Megabytes. Es werden jedoch keine strikten zeitlichen Anforderungen an die Übertragung gestellt. Der Datenaustausch sollte im Bereich weniger Sekunden erfolgt sein.
- **Produktionsleitebene:** Produktions- und Fertigungssteuerung unterliegen den Einheiten der Produktionsleitebene. Lokale Netztechniken werden in diesem Bereich zur Erfüllung der Kommunikationsaufgaben eingesetzt. Die der Unternehmensleitebene untergeordnete Ebene verlangt ebenfalls die Abwicklung des Datenaustauschs im Sekundenbereich.
- **Prozeßleitebene:** In der Prozeßleitebene sind alle Einrichtungen vereint, die technische Prozesse regeln und überwachen. Aktualisierungszeiten von Daten können je nach Anwendung auch zeitkritisch sein. Die zu steuernde Anlage wird hier als Ganzes betrachtet, wobei allgemeine Betriebsdaten erfaßt und Trends registriert werden. In dieser Ebene sind lokale Netze aber auch Feldbusse anzutreffen. Mittels dezentraler Automatisierung ist es möglich, kleine abgeschlossene Systeme (z.B. Fertigungsinseln oder Schienenstränge und Weichen) zu steuern. Der Verbund solcher abgeschlossenen Systeme wird hier angestrebt. Auf dieser Ebene werden bereits strengere zeitliche Anforderungen an die Übertragungsdauer gestellt. Prompte Reaktionen auf Ausnahmesituationen werden verlangt. Dazu ist der Austausch von einigen hundert Bytes innerhalb eines Bereiches von bis zu einer Sekunde abzuwickeln.
- **Feldebene (Informationsverarbeitung):** Die Geräte der Feldebene befinden sich in der Nähe des technischen Prozesses bzw. der Steuerung. Meßwerte, Zustände u.ä. werden hier bereits in aggregierter Form angezeigt und verarbeitet. Feldbusse mit speziell auf diese Aufgabenstellung zugeschnittenem Funktionsumfang finden hier ihren Einsatz. Dazu gehört unter anderem der PROFIBUS. Die hier und in der Sensor-/Aktorebene anfallenden Daten sind aufgrund ihrer Prozeßnähe mit harten Zeitanforderungen hinsichtlich Transport, Auswertung und Modifikation versehen. Diese Zeitanforderungen lassen sich in einem Bereich von einer Millisekunde bis zu 1 Sekunde klassifizieren und bedeuten, daß die Zeit, in der die Daten aktualisiert werden, der Dynamik des Prozesses angepaßt ist. Beispiele hierfür sind einerseits Klimaregelungen in Gebäuden und andererseits Alarmer ausgelöst durch Rauchmelder.

- **Feldebene (Sensor-/Aktorebene):** Alle Aktionen, die einzelnen Prozeßzustände betreffend, werden in der Sensor- / Aktorebene behandelt. Hier müssen die härtesten Zeitanforderungen bewältigt werden. Diese liegen häufig im Bereich von weniger als einer Millisekunde. Direkt am technischen Prozeß werden die physikalischen Größen erfaßt und von dort weitergeleitet. Eine Verarbeitung findet kaum statt. In diesem Bereich werden typischerweise nur wenige Bytes zwischen den Komponenten ausgetauscht. Spezielle Sensor/Aktorbusse, aber auch der PROFIBUS bilden die Kommunikationsplattform [DFAM94].

Wichtig ist es jedoch, dieses Ebenenmodell als Gesamtheit zu betrachten. Informationen werden nicht nur innerhalb einer Ebene ausgetauscht, sondern müssen auch ebenenübergreifend zur Verfügung stehen. Trotz der durch die Aufgabenvielfalt hervorgerufenen Diversifizierung der Kommunikationssysteme muß eine durchgängige Informationsverteilung bzw. ein vertikaler Informationsfluß gewährleistet sein. Dazu tragen Übergänge zwischen den jeweils spezialisierten Kommunikationssystemen bei. Bezogen auf das Ebenenmodell bewegt sich die Arbeit im Bereich der Feldebene und der Prozeßleitebene. An den Stellen, wo sich Anknüpfungspunkte zu höheren Ebenen aus kommunikationstechnischer Sicht ergeben, werden diese aus dem Kontext der Arbeit betrachtet.

2.2 Feldbussysteme

Zur Erfüllung feldbusspezifischer Kommunikationsaufgaben ist es nicht immer erforderlich, alle Schichten des OSI-Referenzmodells auszufüllen. Bei der Implementation aller Schichten nehmen die Komplexität in Bezug auf Kodierung und der Overhead bei der Protokollverarbeitung zu. Insgesamt ist die Effizienz geringer, was sich in einem schlechteren Zeitverhalten niederschlägt. Feldbussysteme übertragen relativ kleine Datenmengen. An sie besteht die Anforderung, möglichst wenig Übertragungsverzögerung hervorzurufen, bzw. harten Zeitanforderungen bei der Datenübertragung nachzukommen. Die Medienzugriffsverfahren und die Bearbeitungsmethoden der Dateneinheiten innerhalb der Endsysteme sind dahingehend ausgerichtet. Resultierend aus diesen Fakten ergibt sich, daß bei der Mehrzahl existierender Feldbusse lediglich die Schichten 1, 2 und 7 ausgeprägt sind. Die Funktionalität der nicht vorhandenen Schichten wird teilweise in die Schichten 2 und 7 integriert, wozu bei Bedarf entsprechende Teilschichten oder Anpassungsschichten eingeführt werden [ReLe94].

2.2.1 Architektur und Vergleich mit anderen Kommunikationssystemen

Verglichen mit einem komplexen WAN oder LAN, ist die Struktur eines Feldbusses relativ einfach. Diese Einfachheit resultiert aus Überlegungen, die aus der Feldbussicht mit Funktionen überladenen Protokolle der Schichten 1 und 2 der LANs heranzuziehen, zu vereinfachen und für die Belange von Feldbussen zu optimieren [Pfei92, Schn99]. Die Ausprägung aller 7 Schichten des ISO/OSI-Referenzmodells erwies sich deshalb als nicht notwendig, da beispielsweise die Transportschicht und die Netzwerkschicht offensichtlich aufgrund der lokalen Begrenztheit und der dedizierten Aufgabenstellungen nicht benötigt werden. Der zwischen zwei Schichten jeweils anfallende Protokolloverhead in der Form des Hinzufügens von Steuerinformationen führt zu einer geringeren Effizienz. Gleiches gilt für die Aufbereitung der Daten (Felder füllen, Prüfsummenberechnung). Daher wurden beim Entwurf zum Zweck der Optimierung und der Steigerung der Effizienz nur so wenig Funktionalität wie nötig implementiert.

In der Hierarchie der industriellen Kommunikation entspricht der Feldbuseinsatz gemäß Abbildung 4 im klassischen Sinne der Vernetzung der untersten beiden Ebenen [Elna92]. Mittlerweile werden aber an einen Feldbus auch andere Anforderungen gestellt. So ist oftmals eine Vernetzung mit Geräten höherer Ebenen (Prozeßleitebene und Produktionsleitebene) wünschenswert. Da die Anforderungen an das Kommunikationssystem aber von der Hierarchiestufe der Automatisierungsebene abhängig sind, können nur wenige Feldbusse alle Aufgaben lösen und dann auch nicht immer optimal [Früh97]. Allgemein gilt: je höher die Ebene, desto größer die anfallenden Datenmengen und desto weniger kritisch sind die Reaktionszeiten. Busse, die für die unterste Ebene konzipiert sind, werden zur weiteren Differenzierung von anderen Feldbussen als Sensor-/Aktorbusse bezeichnet.

2.2.2 Einsatzbereiche von Feldbussystemen

Die im vorangegangenen Abschnitt dargestellten Unterschiede zu anderen Kommunikationssystemen und der Zwang zu hoher Effizienz resultieren aus den spezifischen Anforderungen, welche von den einzelnen Einsatzbereichen an die Feldbusse gestellt werden [Bors92, Bend93, Phoe98, Klou98]. In diesem Abschnitt werden diese Anwendungsgebiete von Feldbussen charakterisiert und die charakteristischen Anforderungen beleuchtet.

- **Anlagentechnik**
Die Anlagentechnik verlangt extrem hohe Zuverlässigkeit. Insbesondere die Eigensicherheit bedingt der Einsatz im explosionsgefährdeten Umfeld. Damit zusammen hängt eine geforderte klimatische Verträglichkeit. In Bezug auf die Übertragungsgeschwindigkeit und das Reaktionsverhalten sind meist moderate Werte von 10 ms ausreichend. Mehrheitlich wird die zyklische Abfrage von Systemzuständen gefordert. Weniger sind es ereignisgesteuerte Nachrichten, die das Kommunikationsaufkommen bestimmen. Leitungsausdehnungen bis zu einem Kilometer sind die Regel.
- **Fahrzeugtechnik**
Neben der geforderten Miniaturisierung der Feldgeräte wird in diesem Anwendungsbereich auf mechanische Festigkeit Wert gelegt. Sehr kurze Reaktionszeiten von meist weniger als 1 ms werden gefordert. In der Hauptsache ist die Kommunikation hier ereignisgesteuert mit wenigen zu übertragenden Bytes. Bustopologien mit einer Ausdehnung von 10-50 m eignen sich sehr gut für diesen Anwendungsbereich.
- **Fertigungstechnik**
Die anzuschließenden Geräte wie Robotersteuerungen und programmierbare Steuerungen sind komplexerer Natur als Sensoren und Aktoren, die hier nur selten eingesetzt werden. Datenlängen bis zu 64 Bytes und überwiegend zeitunkritische Übertragungsprozeduren im Bereich zwischen 5 ms und einer Minute bestimmen das Kommunikationsgeschehen. Jedoch müssen auch Alarm-Nachrichten von 2-8 Byte Länge innerhalb weniger Millisekunden übertragen werden können. Meßwarten liegen meist in der Nähe des zu kontrollierenden Prozesses mit einer Entfernung von bis zu 100 m. Die zentrale Steuerung mehrerer Prozesse wird aber zunehmend erwünscht.
- **Gebäudeleittechnik**
In der Gebäudeleittechnik sind einerseits sehr große Entfernungen zwischen den Feldelementen zu verzeichnen, andererseits verlangt die Kommunikation aber, außer bei Alar-

men, keine harten Zeitkriterien. Die Anzahl der anzuschließenden Sensoren und komplexeren Geräte kann aber bis zu mehreren Hundert Stück betragen.

- **Verfahrenstechnik:**

Die Dimensionen von Kommunikationssystemen bewegen sich in diesem Bereich zwischen wenigen Metern und bis zu 10 Kilometern. Für Betriebsdaten werden Reaktionszeiten von bis zu 500 ms kalkuliert. Alarme jedoch müssen bereits wenige Millisekunden nach Auslösen Reaktionen hervorrufen. Grundsätzlich bewegt sich die zu übertragende Anzahl Bytes bei unter 10.

2.2.3 Varianten von Feldbussystemen

Das weite Aufgabenfeld und die verschiedenartigen Anforderungen der einzelnen Einsatzgebiete von Feldbussen führten zu einer Vielzahl funktioneller und topologischer Varianten von Feldbussystemen, die nebeneinander auf dem Markt existieren. Dieses breite Spektrum ist auch auf die vielen verschiedenen Anforderungen der einzelnen Anwenderindustrieweige sowie auf firmenpolitische Interessen zurückzuführen und nur wenige Feldbusse sind, wie der PROFIBUS, standardisiert.

Eine Einteilung verbreiteter Feldbussysteme wurde in der Abbildung 5 nach dem Buszugriffsverfahren vorgenommen. Die Organisation des Buszugriffs ist als Hauptkriterium für die Erfüllung dedizierter Reaktionszeiten maßgeblich. Weitere nachgeordnete Eigenschaften wurden entsprechend den Einsatzzwecken definiert. Alle Systeme basieren auf der Zeitmultiplextechnik [Buss96, ISO11519-1].

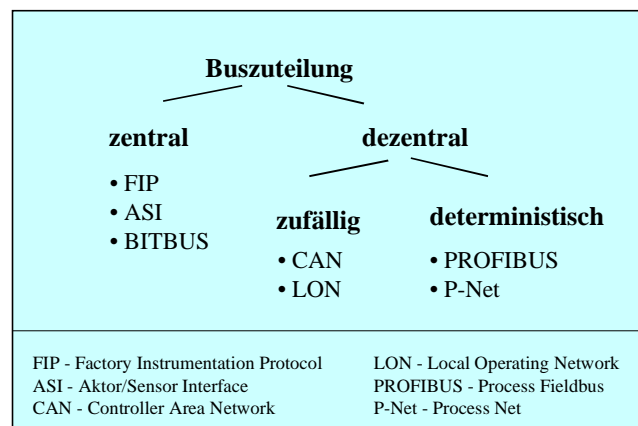


Abbildung 5: Einteilung verschiedener Feldbussysteme nach Zugriffsverfahren

Systeme mit dezentraler Buszuteilung werden in solche mit deterministischem Buszugriff (Process Fieldbus, PROFIBUS; Process-Net, P-Net) und solche mit zufälligem Buszugriff (Controller Area Network, CAN; Local Operating Network, LON) eingeteilt. Die Vorteile der deterministischen Verfahren liegen im berechenbaren Antwortzeitverhalten und im Erreichen äquidistanter Nachrichtenzyklen. Nachteilig wirkt sich hier der Umstand aus, daß z.B. dringende Meldungen erst nach Erhalt der Sendeberechtigung abgesetzt werden können.

Dies umgehen Systeme mit zufälligem Buszugriff. Die Busbelegung erfolgt nicht nach einem definierten Schema, sondern willkürlich. Alle Teilnehmer bewerben sich um das Zugriffsrecht auf das Medium. Bei gleichzeitigem Zugriff von zwei oder mehr Stationen kommt es zu Kollisionen, für die Auflösungsmechanismen vorgesehen werden müssen. Die Priorisierung ein-

zelter Stationen oder Nachrichten kann aber vorgenommen werden, um der Dringlichkeit bestimmter Meldungen Rechnung zu tragen. Eine ereignisgesteuerte Kommunikation wird bei zufälligem Buszugriff möglich, bei der nur dann Übertragungen ausgelöst werden, wenn dies nötig ist. Gegenüber den deterministisch arbeitenden Zugriffsverfahren resultieren hieraus im allgemeinen geringere mittlere Busbelastungen sowie im Einzelfall sehr kurze Latenzzeiten. Eine ereignisgesteuerte Kommunikation bedingt aber ein undefinierbares Antwortzeitverhalten.

Die zentrale Buszuteilung (Factory Instrumentation Protocol, FIP; Aktor/Sensor-Interface, ASI) bedingt, daß ein Teilnehmer als Leitstation mit der Buszuweisung, Übertragungsüberwachung und Fehlerbehandlung beauftragt ist. Die Leitstation überträgt an die Teilnehmer entweder zyklisch das Senderecht oder entsprechend auf Anforderung oder nach definierten Scheduling-Mechanismen. Etwas anders verläuft die Buszuteilung beim zentral organisierten Zeitscheibenverfahren. Hier wird in einem Kommunikationszyklus für jeden Teilnehmer zyklisch eine Zeitspanne für Übertragungen eingeräumt. Eine genaue Synchronisation der Teilnehmer ist dazu aber Voraussetzung. Als nachteilig ist bei Systemen mit zentraler Zuteilung der Sendeberechtigung anzusehen, daß der Ausfall der Komponente, welche die Zuteilung regelt, einem Systemausfall gleichkommt [Krie98].

2.3 PROFIBUS

PROFIBUS [DIN19245] ist aus einem Verbundprojekt unter Förderung des Bundesministeriums für Forschung und Technik hervorgegangen. Mehrere namhafte Firmen waren an diesem Projekt führend beteiligt. 1990 wurde der PROFIBUS-Spezifikation der Status einer Deutschen Norm erteilt. Große Teile dieser Norm sind in die Europäische Norm [EN50170] eingeflossen. Im folgenden werden die Eigenschaften von PROFIBUS dargestellt. Von besonderem Interesse für die vorliegende Arbeit ist das Verhalten der Schicht 2 von PROFIBUS. Eine Übersicht zu der von PROFIBUS verwendeten Terminologie sowie zu Parametern und Abkürzungen ist Anhang B entnehmbar.

PROFIBUS arbeitet mit einem hybriden Buszugriffsverfahren, dem Token-Passing in Verbindung mit dem Master-Slave-Prinzip. Das Token wird unter den Master-Stationen herumgereicht. Diese wickeln nach Tokenerhalt die Nachrichtenzyklen mit anderen Masters sowie den Slaves ab. Im Vergleich zu anderen Feldbussen ist PROFIBUS komplexer, aber gleichzeitig innerhalb der kommunikationstechnischen Aufgabenstellungen in der Automatisierungstechnik für ein breiteres Anwendungsfeld einsetzbar. Der PROFIBUS ist mit Hilfe verschiedener Verfahren in der Lage, ausgefallene Teilnehmer zu erkennen. Die maximale Sendeberechtigungszeit wird mit Hilfe der Token-Soll-Umlaufzeit geregelt. Nachrichten können mit zwei Prioritätsstufen übertragen werden. Insgesamt dürfen 127 Teilnehmer an ein Segment angeschlossen werden. Die Übertragung erfolgt blockweise in Telegrammen unterschiedlicher Ausprägung. Es lassen sich sehr kurze Telegramme mit oder ohne Datenteil sowie variabel lange Telegramme mit bis zu 255 Byte Gesamtlänge übertragen. Fehler in Telegrammen (Aufruf oder Antwort / Quittung) führen zu Aufrufwiederholungen des Masters (Initiator des Nachrichtenzyklus).

Der PROFIBUS gehört damit in die Klasse der Feldbusse mit dezentraler Buszuteilung und deterministischem Buszugriff.

Abbildung 6 zeigt detailliert die Einteilung der Schichten von PROFIBUS mit den Diensten, die von den Schichten jeweils angeboten werden. Die Schichten 3 bis 6 sind nicht vorhanden.

Statt dessen sorgt eine Adaptionsschicht (Lower Layer Interface) für die für PROFIBUS relevanten Funktionen dieser Schichten.

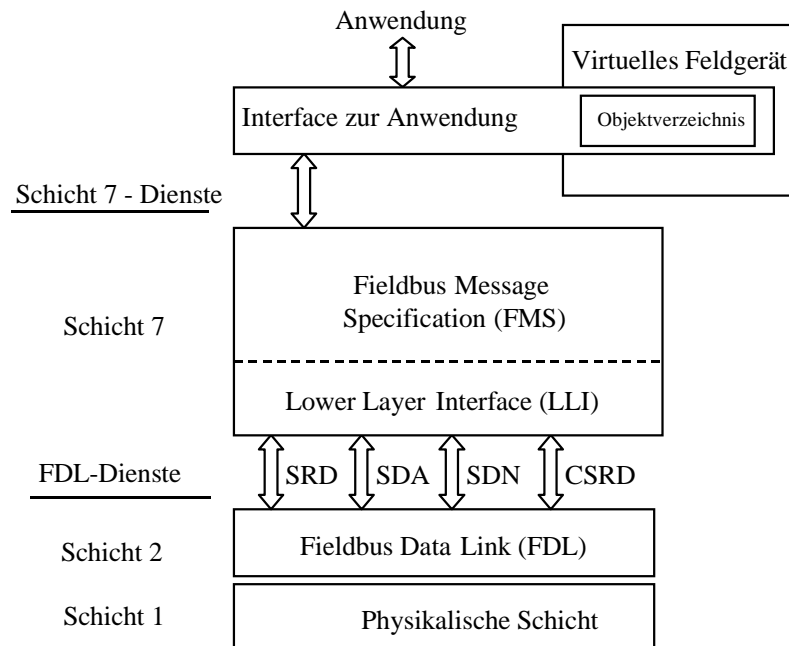


Abbildung 6: PROFIBUS im OSI-Referenzmodell

Die Anwendungsschicht von PROFIBUS sah zunächst nur die Ausprägung FMS (Fieldbus Message Specification) vor. Für die ausgeprägten Schichten sind zudem Funktionen des Managements definiert.

Der Fieldbus Data Link Layer bietet vier verschiedene Dienste an, die im Abschnitt 2.3.3 näher beschrieben werden. Zwischen Schicht 7 und Schicht 2 ist eine Adaption erforderlich. Diese nimmt das Lower Layer Interface (LLI) vor. Die Aufgaben des LLI sind die Abbildung der FMS-Dienste auf die FDL-Dienste, Verbindungsaufbau und Verbindungsabbau, sowie Verbindungsüberwachung und Flußkontrolle.

Das Virtual Field Device repräsentiert eindeutig den Teil eines Anwendungsprozesses, der durch die Kommunikation sichtbar und erreichbar ist. Das Kommunikationsverhalten des Anwendungsprozesses wird durch das Modell des Virtual Field Device beschrieben. Dieses wiederum wird durch ein virtuelles Objekt repräsentiert, dessen Eigenschaften in einem Objektverzeichnis (OV) abgelegt sind. Neben PROFIBUS-FMS sind zwei weitere spezialisierte PROFIBUS-Varianten mit eigenen Einsatzbereichen standardisiert worden.

- **PROFIBUS FMS – (Fieldbus Message Specification)**
FMS ist geeignet für die allgemeine Datenkommunikation auf der Feldebene. Die Spezifikation bietet einen großen Funktionsumfang und ist deshalb geeignet, auch anspruchsvolle Kommunikationsaufgaben wie die Kommunikation zwischen Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) und Personal Computern zu bewältigen.
- **PROFIBUS DP – (Decentralized Periphery)**

DP ist speziell für sehr schnelle Datenkommunikation in der Fabrikautomatisierung und der Gebäudeautomatisierung entwickelt worden. DP ist auf hohe Geschwindigkeiten ausgelegt und wird speziell für zeitkritische Steuerungsvorgänge eingesetzt. Bei PROFIBUS DP sind nur die Schichten 1 und 2 ausgeprägt. Die Kommunikationsfunktionalität wird über eine definierte Dienstschnittstelle zur Verfügung gestellt [Popp97].

- **PROFIBUS PA – (Process Automation)**

PA ist auf die Anforderungen der Kommunikation im prozeßnahen Bereich ausgelegt. Dazu verfügt PA über spezielle Vorkehrungen zur Wahrung der Sicherheit etwa im explosionsgefährdeten Bereich. Damit verbunden ist auch die Möglichkeit der Spannungsversorgung von Feldgeräten über den Bus.

Die Arbeit wird sich im weiteren auf die Bereiche FMS und DP konzentrieren. PROFIBUS PA besitzt in Bezug auf die Kommunikation keine Charakteristik, die sich deutlich von DP unterscheidet. Daher wird auf PROFIBUS PA im weiteren nicht explizit eingegangen.

2.3.1 Übertragungstechnik

Die PROFIBUS Übertragungstechnik basiert auf dem Standard RS 485. Die Verkabelung erfolgt busförmig. Als Medium wird eine verdrehte Zweidrahtleitung verwendet. Daneben besteht auch die Möglichkeit, auf Teilstrecken nach entsprechender Signalumwandlung Lichtwellenleiter als alternative Übertragungstechnik einzusetzen. Pro Bussegment können bis zu 127 Teilnehmer angeschlossen werden. Mit dem Einsatz von Leitungsverstärkern (Repeater) wird die Kopplung von Bussegmenten möglich, wobei zwischen 2 Segmenten maximal 3 Repeater vorhanden sein dürfen. Die Repeater zählen als Teilnehmer.

2.3.2 Buszugriffs- und Übertragungsprotokoll

Beim PROFIBUS handelt es sich um einen kontrollierten Buszugriff mittels eines hybriden, aus Token-Passing und dem Master-Slave-Prinzip bestehenden Verfahrens. Die Zugriffskontrolle befindet sich dezentral in jedem Master. Passive Stationen (Slaves) üben das Senderecht nur nach erfolgter Aufforderung durch einen Master aus. Die Sendeberechtigung wird von Master zu Master in Richtung aufsteigender Adressen weitergegeben. Die aktiven Komponenten bilden damit einen logischen Ring. Zur Aufrechterhaltung dieses Prinzips kennt jeder Master die Adressen seines Vorgängers und seines Nachfolgers. Diese werden auch dynamisch aktualisiert.

Darüber hinaus können Teilnehmer im laufenden Betrieb hinzugefügt bzw. entfernt werden. Der Nachrichtenaustausch findet mit der Ausnahme des gleichzeitigen Adressierung mehrerer Teilnehmer in Zyklen statt. Dabei besteht ein Zyklus aus einem Aufruftelegramm eines aktiven Teilnehmers, das entweder an einem anderen aktiven oder an einen passiven Teilnehmer gerichtet ist. Daraufhin antwortet der adressierte Teilnehmer entweder mit einer Kurzquittung (1 Byte Acknowledgement, ohne Daten) oder mit einem Antworttelegramm (definiertes Telegrammformat, mit Daten). Die Tokenweitergabe wird nicht als ein derartiger Zyklus angesehen. Hier übernimmt der adressierte Teilnehmer das Token ohne Sendung einer Quittung. Abbildung 7 zeigt beispielhaft die Situation auf dem Bus während der Dauer eines Nachrichtenzyklus, beginnend mit dem Tokenerhalt. Erläuterungen zu den Zeiten sind Abschnitt 2.3.2.6 zu entnehmen. Daraufhin verstreicht die T_{SDI} , die Zeit, die der Master zur Aufbereitung des Nachrichtentelegramms braucht. Im Anschluß wird die Anforderung (Request) versendet. Es verstreicht die Sendezeit der Anforderung. Der adressierte Teilnehmer braucht sei-

nerseits Zeit, um das Antworttelegramm zusammenzustellen, T_{SDR} . Schließlich wird das Response-Telegramm an den anfordernden Master versendet. Dieser kann daraufhin entweder einen weiteren Request aussenden oder das Token weitergeben. Durch ein solches Verhalten zeichnen sich Stop-and-Wait Systeme, zu denen der PROFIBUS gehört, aus. Während der Phasen T_{SDR} und T_{SDI} findet demzufolge kein weiterer Datenverkehr statt.

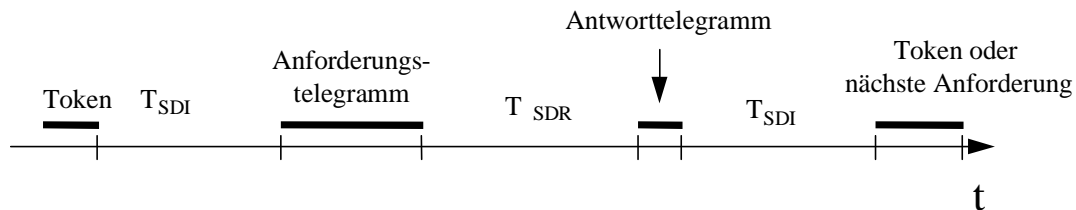


Abbildung 7: PROFIBUS Nachrichtenzyklus

Es ist definiert, daß außer dem jeweiligen Sender alle Teilnehmer generell das Geschehen auf dem Bus mithören. Diese Forderung ist im Hinblick auf die Kopplung von PROFIBUSsen von besonderer Relevanz. Es antwortet jedoch nur der adressierte Teilnehmer. Antworten oder Quittungen müssen spätestens nach einer parametrisierten Zeitspanne, der Slot-Zeit, beim Aufrufer angekommen sein. Anderenfalls hat dieser den Aufruf zu wiederholen. Die Anzahl der Wiederholversuche bis zur erfolgreichen Abwicklung eines Nachrichtenzyklus wird systemweit parametrisiert und kann zwischen 1 und 8 betragen. Die Slot-Zeit orientiert sich an der Dauer der Übertragung der Telegramme in beide Richtungen zuzüglich der Protokollbearbeitungszeit des antwortenden Teilnehmers. Unterschieden wird ferner zwischen azyklischer Betriebsart, die für spontane Aufrufe (besonders Fehlermeldungen und Alarmer) bestimmt ist und zyklischer Betriebsart (Polling), welche für periodisch wiederkehrende Aufrufe vorgesehen ist. In der Abfolge der Betriebsarten hat der azyklische Betrieb Vorrang vor dem zyklischen Betrieb.

2.3.2.1 Token-Verwaltung und Token-Weitergabe

Jede aktive Station muß die Adressen ihres Vorgängers und ihres Nachfolgers im logischen Token Ring kennen. Darüber hinaus führt jeder Master eine Liste der aktiven Stationen (LAS), die er im laufenden Betrieb aufbaut. Als Vorgängeradresse wird der Absender des an die eigene Adresse gerichteten Token-Telegramms festgelegt. Die Adresse des Nachfolgers wird erstmalig bei der Initialisierung des logischen Ringes festgestellt. Es ist erlaubt, aktive und passive Teilnehmer zu beliebigen Zeitpunkten an den Bus anzuschließen oder diese vom Bus zu trennen. Durch dynamische Änderungen im laufenden Betrieb können sich aber beide Adressen potentiell ändern. PROFIBUS verfügt zur Erkennung dessen über einen GAP-Mechanismus. Nach einem vorgegebenen Intervall führt jeder Master im Anschluß an die Abwicklung aller anstehenden Kommunikationsaufträge bei noch verbleibender Token-Haltezeit die GAP-Aktualisierung durch. Dabei wird in aufsteigender Reihenfolge der Adreßbereich von der Adresse nach der eigenen bis zur Adresse des Nachfolgers (jeweils eine Adresse pro Tokenerhalt) mittels eines Request-Telegramms abgefragt. Bleibt die Antwort aus, ist die Adresse nicht vergeben. Im positiven Falle wird der Teilnehmer mit dieser Adresse zum aktuellen Nachfolger. Der Fall, daß der aktuelle Nachfolger nicht mehr am Bus aktiv ist, wird dadurch erkannt, daß nach der Tokenweitergabe keine Reaktion des Nachfolgers zu

verzeichnen ist. Der jeweilige Tokenhalter gibt das Token an dem ihm bekannten Nachfolger weiter. Daraufhin wartet der Tokenhalter eine vorgegebene Zeitspanne darauf, daß er auf dem Bus eine Aktivität bemerkt, die von seinem Nachfolger ausgeht. Dies kann die Tokenweitergabe an den Nachfolger sein oder ein Anforderungstelegramm. In diesem Falle, war die Tokenweitergabe erfolgreich. Im dem Fall, daß der adressierte Master nicht wie beschrieben aktiv wird, wiederholt der Master die Tokenweitergabe bis zu zweimal. Bleibt auch darauf die Reaktion aus, wird versucht, das Token an den nächsten Teilnehmer in der Liste aktiver Stationen (LAS) weiterzugeben.

Der PROFIBUS-Standard verlangt zur Tokenverwaltung die Beherrschung von folgenden Ausnahmesituationen:

- a) Tokenverlust
- b) Mehrfache Token
- c) Tokenweitergabe-Fehler
- d) Mehrfachbelegung von Teilnehmeradressen
- e) Teilnehmer mit defektem Sender/Empfänger

2.3.2.2 Initialisierung des logischen Token-Rings

Die Initialisierung des Token-Rings geht vom Teilnehmer mit der kleinsten Adresse aus. Dieser versucht dann die möglichen weiteren Teilnehmer mittels Request-Telegrammen mit aufsteigender Zieladresse zu erfassen. Der erste aktive Teilnehmer, der auf diesen Request antwortet, wird daraufhin als Nachfolger im logischen Ring markiert. An diesen gibt er das Token weiter. Der Nachfolger führt seinerseits diesen Prozeß aus.

Nach einem Tokenverlust wird die Reinitialisierung des logischen Ringes notwendig. Der Teilnehmer mit der niedrigsten Adresse kreiert ein neues Token, weil bei ihm die Time-out Zeit zuerst abläuft (siehe Abschnitt 2.3.2.6) und nimmt die Kommunikation wieder auf.

2.3.2.3 Prioritäten

Bei der Nutzung eines FDL-Dienstes kann zwischen zwei Prioritäten gewählt werden. Die Priorität wird mit der Dienstanforderung übergeben. Zur Abwicklung der Dienste entsprechend den Prioritäten geht die aktive Station so vor, daß zuerst alle hochprioriären Anforderungen erfüllt werden. Danach werden bei noch verbliebener Token-Haltezeit die niederprioriären Zyklen abgewickelt.

Grundsätzlich wird, auch wenn bei Tokenerhalt die tatsächliche Umlaufzeit bereits größer als die Token-Soll-Umlaufzeit ist, ein anstehender hochprioriärer Nachrichtenzyklus abgewickelt. Etwaige Aufrufwiederholungen, die zu diesem Nachrichtenzyklus gehören, werden ungeachtet der Tokenhaltezeit ausgeführt. Das bedeutet, der begonnene Nachrichtenzyklus wird unbedingt zuendegeführt.

2.3.2.4 Azyklischer Send- / Requestbetrieb

In dieser Betriebsart werden sporadisch einzelne Nachrichtenzyklen abgewickelt. Als Reaktion auf Anforderungen von der Anwendungsschicht werden diese sofort nach Tokenerhalt abgearbeitet, solange bis die zur Verfügung stehende Tokenhaltezeit verbraucht ist.

2.3.2.5 Zyklischer Send- / Requestbetrieb

Die Grundlage für diese Betriebsart ist eine Polling-Liste, die von der Anwendungsschicht übergeben wurde. Die in der Polling-Liste eingetragenen Anforderungen werden der Reihe nach abgearbeitet. Daraufhin wird erneut am Anfang der Liste begonnen. Nach dem Erhalt

des Tokens wird aber mit der Abarbeitung der Polling-Liste erst dann begonnen, wenn alle anstehenden hochprioren Nachrichtenzyklen abgearbeitet worden sind. Im Anschluß an den Polling-Listendurchlauf werden die niederprioren Zyklen abgewickelt. Kann während einer Token-Haltezeit nicht die gesamte Polling-Liste abgearbeitet werden, dann wird die Bearbeitung an einer Stelle unterbrochen, d.h. die Polling-Liste wird segmentiert bearbeitet. Beim darauffolgenden Tokenerhalt wird an jener Stelle in der Liste fortgefahren.

2.3.2.6 Systemzeiten und Überwachungszeiten

In jedes PROFIBUS-Gerät wird beim Einschalten neben Parametern wie die Stationsadresse, die maximale Anzahl Aufrufwiederholungen und die Übertragungsgeschwindigkeit, ein Satz von Zeitparametern geladen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die Zeitparameter, mit denen PROFIBUS-Geräte bei Inbetriebnahme versehen werden. Zeiten werden bei PROFIBUS in Bits gemessen. Eine Zeit t in Sekunden muß deshalb durch die Bitzeit t_{BIT} dividiert werden. Die Bitzeit t_{BIT} ist die Zeit, die beim Senden eines Bits verstreicht. Sie entspricht dem reziproken Wert der Übertragungsgeschwindigkeit.

Parameter	Wertebereich
Slot-Zeit	$2^0 \cdot 2^{16} - 1$ Bitzeiten
Station Delay $\min T_{\text{SDR}}$	$2^0 \cdot 2^{16} - 1$ Bitzeiten
*) Station Delay $\max T_{\text{SDR}}$	$2^0 \cdot 2^{16} - 1$ Bitzeiten
*) Modulator-Ausklingszeit T_{QUI}	$2^0 \cdot 2^8 - 1$ Bitzeiten
*) Auslösezeit T_{SET}	$2^0 \cdot 2^8 - 1$ Bitzeiten
*) Token-Soll-Umlaufzeit T_{TR}	$2^0 \cdot 2^{24} - 1$ Bitzeiten

Tabelle 1: Zeitparameter der PROFIBUS-Geräte

*) kennzeichnet Parameter, die nur bei aktiven Teilnehmern eingestellt werden.

Jeder Teilnehmer benötigt Zeit zur Protokollbearbeitung. Diese Zeit ist die verstrichene Zeit nach dem Empfang des letzten Bits eines Telegramms bis zum Senden oder Empfang des ersten Bits des folgenden Telegramms. Dadurch wird der Nachrichtenzyklus entscheidend verzögert. Unterschieden werden drei Verzögerungen durch die Protokollbearbeitung in den Stationen.

- T_{SDI} - Stationsverzögerung des aufrufenden Teilnehmers
- $\min T_{\text{SDR}}$ - Kleinste Stationsverzögerung aller antwortenden Teilnehmer
- $\max T_{\text{SDR}}$ - Größte Stationsverzögerung der antwortenden Teilnehmer

Die beiden Parameter T_{QUI} und T_{SET} werden direkt von der verwendeten Hardware auf der physikalischen Schicht des PROFIBUS-Gerätes bestimmt. Beide zusammen fließen in die Berechnung des Sicherheitszuschlags T_{SM} ein.

Gleichung 1
$$T_{\text{SM}} = 2 + 2 \cdot T_{\text{SET}} + T_{\text{QUI}}$$

Die Idle-Time T_{ID} ist die Zeit, die beim Aufrufer nach dem Empfang des letzten Bits eines Telegramms als Idle auf dem Übertragungsmedium verstreicht, bis das erste Bit des nächsten Telegramms gesendet wird. Bei nicht zu quittierenden Telegrammen gilt entsprechend die Zeitspanne vom Senden des letzten Bits bis zum Senden des ersten Bits des folgenden Telegramms. Unterschieden werden zwei Idle-Times. Eine nach einem Quittungs-, Antwort- oder

Tokentelegramm. Die andere nach einem Aufruftelegramm, das nicht quittiert wird. Wirksam werden hier die Station-Delays. Bei hohen Übertragungsgeschwindigkeiten ergeben sich T_{ID1} aus T_{SDI} und T_{ID2} aus $\max T_{SDR}$.

Die Transmission Delay Time: T_{TD} ist die Zeit, die das vollständige Telegramm benötigt, um vom Sender auf dem Übertragungsmedium zum Empfänger zu gelangen. Bestimmt wird diese Zeit durch die Leitungslänge zwischen Sender und Empfänger. Je Kilometer beträgt diese etwa 5 μs .

Die Kommunikation zwischen zwei PROFIBUS-Geräten wird in der Schicht 2 durch Timer überwacht.

Slot-Timer: Nach dem Aussenden des letzten Bits eines Anforderungstelegramms wartet der Master eine maximale Zeitspanne, bis das erste Telegrammzeichen der Antwort oder der Quittung bei ihm eingetroffen ist. Bleibt dies aus, so wird daraufhin die Neuaussendung der Anforderung eingeleitet. Die genannte Zeitspanne wird als Slot-Zeit bezeichnet. Gleichzeitig wird diese Zeit dazu verwendet, die Token-Weitergabe zu überwachen. Daher werden zwei Slot-Zeiten unterschieden. Nach einem Aufruftelegramm beträgt die Slot-Zeit:

Gleichung 2
$$T_{SL1} = 2 * T_{TD} + \max T_{SDR} + 11 + T_{SM}$$

Nach einem Token-Telegramm ist folgende Slot-Zeit gültig:

Gleichung 3
$$T_{SL2} = 2 * T_{ID1} + \max T_{SDR} + 11 + T_{SM}$$

Systemweit wird aus Gründen der Vereinfachung nur die größere der beiden Slot-Zeiten verwendet.

Time-out Timer: Die Aus-Zeit dient der Überwachung der Busaktivität. Die Aus-Zeit ist in Verbindung mit dem Idle-Timer zu betrachten. Nach dem Empfang des letzten Bits eines Telegramms beginnt die Idle-Time zu laufen bis zum Beginn des Empfangs des nächsten Telegramms. Erreicht der Idle-Timer den Wert der Aus-Zeit, dann gilt der Bus als inaktiv, es liegt ein Fehlerfall vor. Die Aus-Zeit ist entsprechend Gleichung 4 definiert.

Gleichung 4
$$T_{TO} = 6 * T_{SL} + 2 * n * T_{SL}$$

Für aktive Teilnehmer wird für n in Gleichung 4 die Teilnehmeradresse eingesetzt, für passive Teilnehmer ist immer $n=130$.

Durch diese Definition wird gleichzeitig sichergestellt, daß genügend Abstand zur maximal möglichen Idle-Time zwischen zwei Telegrammen besteht und daß nicht alle Master gleichzeitig den Neuanlauf des Systems initiieren wollen.

2.3.2.7 Zyklus- und Systemreaktionszeiten

In einem System mit mehreren aktiven Teilnehmern ist bereits eine Grundlast zu verzeichnen. Diese Busbelastung hat ihre Ursache im Buszugriffsverfahren des PROFIBUS. Das Token wird zyklisch von Master zu Master gereicht. Jeder Master prüft, ob seinerseits Nachrichtenzyklen abzuwickeln sind. Ist dies nicht der Fall, so wird das Token an den nächsten Master weitergegeben. Die Tokenweitergabe konsumiert Zeit. Die gesamte Grundlast je Tokenum-

lauf ergibt sich aus der Anzahl aktiver Teilnehmer und der Dauer der Tokenweitergabe (Token-Zykluszeit T_{TC}). Eine Tokenzykluszeit ergibt sich gemäß Gleichung 5 als Summe aus der Token-Telegrammdauer, der Laufzeit und der Idle-Time.

Gleichung 5
$$T_{TC} = T_{TF} + T_{TD} + T_{ID}$$

Ein Nachrichtenzyklus T_{MC} besteht aus einem Aufruftelegramm und dem Antwort- oder Quittungstelegramm. Diese Zykluszeit setzt sich aus den Laufzeiten, der Sendedauer der Telegramme und den Bearbeitungszeiten entsprechend Gleichung 6 zusammen. Nachdem das Aufruftelegramm den Adressaten erreicht hat, verstreicht die Teilnehmerbearbeitungszeit T_{SDR} . Das ist jene Zeit, welche die antwortende Station benötigt, um das Antworttelegramm zusammenzustellen. Zur Nachrichtenzykluszeit gehört ebenfalls die Protokollbearbeitungszeit des Senders, die der Idle-Time entspricht.

Gleichung 6
$$T_{MC} = T_{S/R} + T_{SDR} + T_{A/R} + T_{ID} + 2 * T_{TD}$$

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit eines PROFIBUS-Systems werden die Nachrichtenrate und die Systemreaktionszeit herangezogen. Die Nachrichtenrate gibt an, wie viele Nachrichten pro Zeitintervall (meist eine Sekunde) ausgetauscht werden können.

In einem System mit nur einem Master ergibt sich die Systemreaktionszeit aus der Nachrichtenzykluszeit und der Anzahl der passiven Teilnehmer. Potentielle Nachrichtenwiederholungen sind dabei zu berücksichtigen.

Die maximale Systemreaktionszeit in einem System mit mehreren aktiven und passiven Teilnehmern entspricht der Token-Soll-Umlaufzeit T_{TR} . Diese sorgt damit für die Einhaltung einer von der Anwendung benötigten Systemreaktionszeit. Sie muß gewährleisten, daß jede Station mindestens die Tokenweitergabe und einen hochprioren Nachrichtenzyklus abwickeln kann. Darüber hinaus müssen die Stationen auch die niederprioren Nachrichtenzyklen und eventuelle Nachrichtenwiederholzyklen bewältigen können. Eine exakte untere Grenze der T_{TR} läßt sich aufgrund der pro Tokenumlauf stark variierenden Anzahl und Länge der Telegramme nur schwer ermitteln. Zur Abschätzung der T_{TR} lassen sich Durchschnitts- oder Maximalwerte der Länge und Anzahl der Telegramme sowie potentielle Nachrichtenwiederholungen zusammen mit der Anzahl der Teilnehmer verwenden. Mit Bezug auf Gleichung 5 und Gleichung 6 und unter Hinzunahme von möglichen Wiederholungen ergibt sich eine Minimale Token-Soll-Umlaufzeit entsprechend Gleichung 7.

Gleichung 7
$$\min T_{TR} = na * (T_{TC} + \text{high } T_{MC}) + k * \text{low } T_{MC} + mt * RET * T_{MC}$$

na : Anzahl aktiver Teilnehmer

k : Voraussichtliche Anzahl niederpriorer Nachrichtenzyklen

mt : Erwartete Anzahl Nachrichtenwiederholzyklen je Tokenumlauf

RET : Zeit für einen Nachrichtenwiederholzyklus

Es ist festgelegt, daß pro Tokenerhalt jeder Teilnehmer mindestens einen hochprioren Nachrichtenzyklus abwickeln darf. Zudem sind niederpriore Nachrichtenzyklen zu berücksichtigen. Schließlich kommen zu der Summe noch Anzahl und Dauer potentieller Wiederholzyklen hinzu.

2.3.2.8 Fehlerbehandlung

Ein Prüfbyte (FCS, siehe Abschnitt 2.3.2.9) in jedem Aufruf- und Antworttelegramm sichert die Telegramme mit einem Hamming-Abstand 4. Bei der Berechnung des FCS werden Quelladresse (SA), Zieladresse (DA), Frame Control (FC) und, wenn vorhanden, die Data-Unit einbezogen. Der PROFIBUS-Standard sieht vor, daß ein vom adressierten Teilnehmer als fehlerhaft erkanntes Aufruftelegramm grundsätzlich nicht quittiert oder beantwortet wird. Statt dessen registriert der Initiator die ausbleibende Reaktion und reagiert darauf nach Ablauf der Slot-Zeit mit einer erneuten Aussendung des Aufruftelegramms. Stellt der Initiator bei einer eingetroffenen Quittung oder Antwort deren Fehlerhaftigkeit fest, wird ebenfalls der Aufruf wiederholt. Aus der Sicht des Initiators ist ein Nachrichtenzyklus damit erst abgeschlossen, wenn eine gültige Antwort oder Quittung empfangen wurde bzw. alle Aufrufwiederholungen ergebnislos blieben. Für den aufgerufenen Teilnehmer gilt, daß er solange mit einer Aufrufwiederholung rechnen muß wie noch kein neuer Aufruf mit geändertem Aufruf- folgebit bei ihm eingetroffen ist oder ein anderer Teilnehmer adressiert wurde.

2.3.2.9 Telegrammaufbau und Telegrammformate

Jedes Telegrammzeichen bei PROFIBUS besteht aus 11 Bit. 8 Bit davon sind Informationen. Diese werden ergänzt durch ein Starbit, ein Stoppbit und ein Paritätsbit.

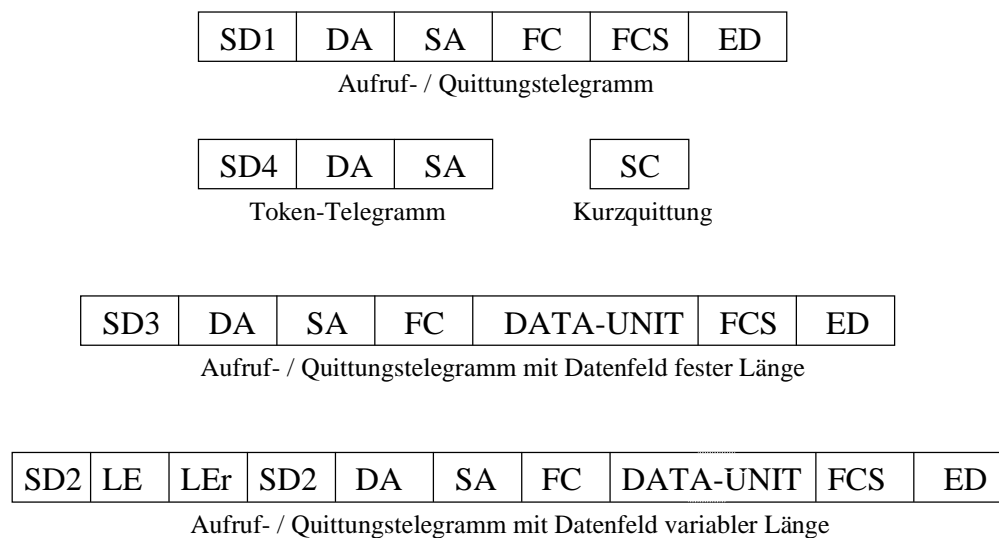


Abbildung 8: PROFIBUS Telegrammformate

Abbildung 8 zeigt die bei PROFIBUS verwendeten Telegrammformate, welche sich durch den Start Delimiter (SD1-SD4) unterscheiden. Das Token-Telegramm hat eine Länge von drei Telegrammzeichen. Daneben findet eine 1 Byte lange Kurzquittung (SC) Verwendung. Aufruf- und Quittungstelegramme müssen nicht zwingend ein Datenfeld besitzen. Die Codierung des Dienstes kann in dem 8 Bit langen Feld Frame Control (FC) übermittelt werden. Besitzen Aufruf- oder Quittungstelegramm ein Datenfeld, dann kann dies eine feste Länge haben oder als Feld variabler Länge gewählt werden. Das Telegramm mit variabler Datenfeldlänge beinhaltet ein Feld, in dem die Länge verzeichnet ist und eine Wiederholung dessen. Insgesamt darf ein PROFIBUS-Telegramm die Länge von 255 Telegrammzeichen nicht überschreiten.

2.3.3 Schnittstelle zur Anwendungsschicht

Zur Anwendungsschicht stellt die FDL-Schicht vier Übertragungsdienste zur Verfügung.

- **Send Data with Acknowledge (SDA)**
Mit Hilfe dieses Dienstes können Daten an einen einzelnen Teilnehmer gesendet werden. Die Anwendungsschicht des Requesters erhält eine Bestätigung über den Empfang oder Nichtempfang der Daten. Bei Übertragungsfehlern wiederholt die FDL die Übertragung.
- **Send Data with No Acknowledge (SDN)**
Dieser Dienst kann dazu verwendet werden, an einen einzelnen Teilnehmer, eine Gruppe oder alle Teilnehmer Daten gleichzeitig zu versenden. Der Anwendungsschicht des Requesters wird eine Bestätigung über die erfolgte Absendung der Daten, nicht aber über den Empfang signalisiert. Eine Rückmeldung für die Übertragung ist damit nicht vorhanden.
- **Send and Request Data with Reply (SRD)**
Dieser Dienst gestattet es, Daten an einen einzelnen Empfänger zu senden und gleichzeitig Daten von diesem anzufordern. Daneben ist es auch möglich, Daten vom Empfänger anzufordern, ohne im Request-Telegramm Daten an ihn zu übermitteln. Zur Anwendungsschicht werden die angeforderten Daten übergeben oder eine Anzeige darüber, daß die Daten nicht verfügbar waren oder eine Benachrichtigung über erfolglose Übertragungsversuche. Im Fehlerfalle wird die Übertragung durch die FDL wiederholt.
- **Cyclic Send and Request Data with Reply (CSRD)**
Ähnlich dem SRD-Dienst, hier jedoch zyklisch, können mit diesem Dienst Daten an einen einzelnen Empfänger übermittelt und gleichzeitig Daten von diesem angefordert werden. Der Anwendungsschicht des Requesters werden entweder zyklisch die empfangenen Daten übergeben, oder eine Anzeige darüber, daß die Daten nicht verfügbar waren oder eine Quittung über erfolglose Übertragungsversuche. In der Polling-Liste, die der FDL-Schicht übergeben wird, sind die Empfänger sowie die Anzahl und die Reihenfolge der Übertragungen verzeichnet.

2.3.4 PROFIBUS-Anwendungsschicht

In diesem Abschnitt stehen die beiden näher zu betrachtenden PROFIBUS-Varianten FMS und DP mit ihren speziell entworfenen Anwendungsschichten im Mittelpunkt der Diskussion.

Anwendungsschicht des PROFIBUS FMS

Die Anwendungsschicht des PROFIBUS FMS besteht aus zwei Instanzen, der Fieldbus Message Specification (FMS) und dem Lower Layer Interface (LLI). Das PROFIBUS Kommunikationsmodell basiert darauf, verteilte Anwendungsprozesse über Kommunikationsbeziehungen zu einem Gesamtprozeß zu verbinden. Ein Anwendungsprozeß arbeitet mit einer abstrakten Abbildung von Attributen, Regeln und Operationen auf Prozeßobjekte. Zur Kommunikation hat der Prozeß Zugang über eindeutig vorgegebene Endpunkte. Zwischen zwei Anwendungsprozessen können eine oder mehrere Kommunikationsbeziehungen bestehen. Kommunikationsobjekte repräsentieren Prozeßobjekte, die von den dafür vorgesehenen FMS-Diensten angesprochen und bearbeitet werden. Es werden FMS-Dienste unterschieden, bei

denen der entfernte Anwendungsprozeß nach Ausführung eine Bestätigung verschickt und Dienste, deren Ausführung nicht bestätigt wird.

Ein Virtuelles Field Device (VFD) repräsentiert den Teil des Anwendungsprozesses, der durch die Kommunikation von außen erreichbar ist. Jede Kommunikationsbeziehung wird vor ihrer Initialisierung projektiert und in einer Kommunikationsbeziehungsliste (KBL) gespeichert. Kommunikationsbeziehungen werden nach der Anzahl beteiligter Anwendungsprozesse nach one-to-one, one-to-many und one-to-all unterschieden. Verbindungsorientierte Kommunikationsbeziehungen bestehen in Bezug auf die Anwendungsschicht aus den drei Phasen Aufbau, Transfer von Daten und Abbau der Verbindung. Eine bestehende Verbindung kann mittels einer Überwachungsfunktion im LLI auf Verfügbarkeit kontrolliert werden. Für die Kommunikation von Master und Slave sind folgende Kommunikationsarten festgelegt worden.

- **Zyklischer Datenverkehr ohne Slave-Initiative**
Diese Kommunikationsart ist für Anwendungsfälle vorgesehen, bei denen ein Prozeßabbild auf der Masterseite zyklisch aktualisiert werden muß oder Aktoren zyklisch mit Daten versorgt und deren Ausfälle sofort erkannt werden müssen.
- **Zyklischer Datenverkehr mit Slave-Initiative / Azyklischer Datenverkehr mit Slave-Initiative**
Zur schnellen Übermittlung von Fehlerzuständen oder Alarmen sind diese beiden Betriebsarten mit Slave Initiative vorgesehen.
- **Azyklischer Datenverkehr ohne Slave-Initiative**
Bei geringer Häufigkeit des Datenaustausches oder bei nur spontanen Kommunikationswünschen der Anwendung eignet sich diese Kommunikationsart.

Slaves dürfen nicht von sich aus einen Datenaustausch einleiten. Dennoch ist es ihnen erlaubt, in den Antwort-Telegrammen auf Anforderungen eines Masters ihren Kommunikationswunsch mitzuteilen oder den Master damit auf besondere Zustände aufmerksam zu machen. Zwischen zwei Masters können nur Verbindungen für azyklischen Datenverkehr bestehen. Eine verbindungslose Kommunikationsbeziehung kann entweder eine one-to-many oder one-to-all Beziehung sein.

Anwendungsschicht des PROFIBUS DP

Auf der Schicht 2 beschränkt sich PROFIBUS-DP darauf, nur die Dienste SRD und SDN anzubieten [Popp97]. Besonderes Merkmal von PROFIBUS DP ist, daß die Schicht 7 nicht ausgeprägt ist. Die Dienste der Schicht 2 werden direkt genutzt. Bei PROFIBUS DP gibt es einen Master, der mit den Slaves in einer festgelegten, immer wiederkehrenden Reihenfolge kommuniziert.

PROFIBUS DP verfügt über 2 Klassen von Masters. Master der einen Klasse wickeln den Datenaustausch mit den Slaves ab. Die Master der Klasse 2 übernehmen lediglich administrative Aufgaben. Um die Kommunikation einfach und effizient zu halten, ist der Datenaustausch zwischen Klasse 1 Masters nicht vorgesehen.

Operationen von PROFIBUS FMS und DP können auch gemischt in Systemen vorkommen, da beide verträglich miteinander sind. Die Unterscheidung wird hierzu auf der Basis von Dienstzugangspunkten in der Anwendungsschicht getroffen.

Typischerweise werden PROFIBUS DP Systeme mit nur einem Master und einer Anzahl von Slaves konzipiert um die Stärken von DP voll auszuschöpfen [Cena97]. Es ist aber auch möglich, mehrere Master zu verwenden. Das zyklische Anfordern von Daten zwischen Master und den Slaves wird einmal angestoßen und läuft dann ohne Eingriff der Applikation. Die Schicht 2 stellt die von den Slaves abgefragten Informationen der Anwendung in Puffern bereit. Aufgrund des sehr schnellen Datenaustausches bei 12 Mbit/s, der für DP spezifizierten maximalen Datenrate, kann es vorkommen, daß die Aktualisierung der Puffer in der Schicht 2 schneller stattfindet, als diese von der Anwendung ausgelesen werden können. Damit ist immer davon auszugehen, daß jeweils die aktuellsten Daten im Puffer vorhanden sind. Von PROFIBUS DP werden darüber hinaus sowohl Multicasts als auch Broadcasts unterstützt.

2.4 Weitverkehrsnetze, Backbone-Netze und ATM

Unter Weitverkehrsnetzen werden im allgemeinen leistungsfähige Kommunikationsstrukturen verstanden, die größere Entfernungen überbrücken können und Datenströme lokal begrenzter Kommunikationssysteme weiterleiten. An Weitverkehrsnetze sind üblicherweise keine Endgeräte direkt angeschlossen. Im Gegensatz zu lokalen Netzen war jedoch in der Vergangenheit der Datendurchsatz im Weitverkehrsnetz wesentlich geringer. Mit dem Aufkommen der optischen Übertragungstechnik und der Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH) als Übertragungssystem, dessen sich auch ATM bedient, wurde dieser Engpaß beseitigt. Damit war eine Basistechnologie entstanden, die es ermöglicht, auch große Datenvolumina über weite Distanzen zu übertragen. Fortgeschrittene komplexe Anwendungen verlangen nach leistungsfähigen Übertragungssystemen. Heutige Weitverkehrsnetze stellen hohe Übertragungsraten bereit und werden auch weiter zu noch leistungsfähigeren Strukturen mit Übertragungsraten im Gigabitbereich ausgebaut.

Backbone-Netze bilden eine Infrastruktur zum Datenaustausch zwischen territorial verteilten Endgeräten oder lokalen Subnetzen. Ein Backbone hat üblicherweise eine höhere Übertragungskapazität als die angeschlossenen Netze. Für die weitere Betrachtung wird entsprechend der Begriff Backbone auch zur Bezeichnung des Verbindungsnetzes für PROFIBUS-Segmente verwendet.

Im weiteren Inhalt dieses Abschnitts werden die Grundlagen des Asynchronen Transfermodus erörtert und eine Einordnung in die Netzwelt gegeben. Weiter stehen dann die spezifischen Eigenschaften im Mittelpunkt der Diskussion. Es wird herausgearbeitet, weshalb ATM für die Erfüllung der Aufgabenstellung bedeutungsvoll ist und mit welchen Vorzügen ATM aufwarten kann. Schließlich werden besonders die für die Kopplung wichtigen Leistungseigenschaften in Bezug auf die Dienstqualität vorgestellt.

Ein leistungsfähiger Kandidat als Backbone-System ist der Asynchrone Transfermodus (ATM). Seine charakteristischen Eigenschaften sowie jene Vorzüge gegenüber anderen als Backbone einsetzbaren Systemen werden in diesem Abschnitt vorgestellt. Es wird ferner begründet, weshalb die Wahl bei der Suche nach einem geeigneten Backbone-Netz für die Verbindung von PROFIBUS-Systemen auf ATM fiel [Kyas98].

2.4.1 Der Asynchrone Transfermodus (ATM)

Das heutige Telefonnetz und auch das Schmalband-ISDN beruhen auf dem Prinzip der Leitungsvermittlung, bei der das synchrone Zeitmultiplexverfahren angewendet wird, um Übertragungsleitungen für mehrere Verbindungen gleichzeitig nutzen zu können. Auf den Über-

tragungsleitungen werden Rahmen definiert, die sich periodisch wiederholen. Innerhalb dieser Rahmen werden Zeitschlitzte definiert, die vom Rahmenanfang her durchnummeriert sind. Einer Verbindung werden bestimmte Zeitschlitzte fest und zur alleinigen Nutzung zugeordnet. Mit Hilfe der festen Zuteilung kann die Zuordnung der übertragenen Daten zu einer Verbindung anhand der Nummer des Zeitschlitzes vorgenommen werden. Dieses als synchroner Transfermodus bezeichnete Übermittlungsprinzip ist durch deterministische Abläufe gekennzeichnet und unterliegt keinen statistischen Einflüssen.

Durch die feste Zuteilung der Zeitschlitzte und die starre Umsetzung in den Vermittlungsstellen ist für jede Verbindung der Weg durch das Kommunikationsnetz festgelegt und gleichzeitig ein Kanal mit einer bestimmten Übertragungskapazität fest zugeordnet. Die Verzögerung innerhalb einer Verbindung ist konstant und Informationsverluste werden nicht durch die momentane Auslastung der Vermittlungselemente bestimmt. Bestehende Verbindungen beeinflussen sich nicht gegenseitig.

Im Gegensatz dazu basiert der asynchrone Transfermodus auf dem asynchronen Zeitmultiplexverfahren. Die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität wird auch hier in gleich große Abschnitte unterteilt. Eine Verbindung belegt bei Verwendung des asynchronen Zeitmultiplexverfahrens keine fest zugeordneten Zeitschlitzte, sondern versucht bei Bedarf den nächsten freien Zeitschlitz zu belegen. Da die einzelnen Quellen unabhängig voneinander senden, können sich beim Multiplexen mehrerer Verbindungen Zugriffskonflikte ergeben. Um hierbei Verluste zu vermeiden, werden die nicht sofort in einen Zeitschlitz einschreibbaren Daten zwischengespeichert. Der asynchrone Transfermodus bietet den Vorteil, daß Verbindungen mit unterschiedlichen Datenraten wie auch Verbindungen mit variablen Datenraten unterstützt werden können, ohne durch eine vorgegebene Kanalstruktur eingeschränkt zu werden. Nachteilig wirkt sich hier jedoch die gegenseitige Beeinflussung der bestehenden Verbindungen aus, die sich in einer variablen Übertragungsverzögerung niederschlägt.

ATM-Grundprinzip

ATM basiert auf einem speziellen Paketformat, welches als Zelle bezeichnet wird. Jede Zelle hat eine feste Länge von 53 Bytes und besteht aus einem Kopfteil, welcher Informationen zur Weiterleitung der Zelle durch das Netz enthält, und einem Datenteil. ATM arbeitet verbindungsorientiert, d.h. vor Beginn einer Datenübertragung wird zunächst eine virtuelle Verbindung zwischen Sender und Empfänger hergestellt, die jedoch nicht durchgeschaltet wird. Statt dessen tragen die Zellen Verbindungskennungen, damit in Zwischensystemen und im Endsystem die Zuordnung zu einer Verbindung möglich ist [Blac95]. Aus der Übertragung mittels Zellen fester Länge resultieren einige wesentliche Eigenschaften von ATM. Durch die einheitliche Länge entsteht eine kalkulierbare Verzögerung bei der Übertragung beliebiger Informationen, wodurch auch bei mehreren konkurrierenden Datenströmen für die einzelnen Anwendungen garantierte Bandbreiten vergeben werden können. Die Übertragung selbst basiert auf dem Prinzip der virtuellen Verbindungen. Bei den Verbindungen kann es sich um Punkt-zu-Punkt oder Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen handeln. Verbindungen können mit einer Dienstgüte (Quality of Service) aufgebaut werden. Dabei wird versucht, den jeweiligen Anforderungen bestmöglich gerecht zu werden [SeRe97].

Grundsätzlich sind ATM-Netze in der Lage, für Quellen mit unterschiedlichem Sendeverhalten verschiedene Dienste mit unterschiedlicher Qualität in Bezug auf Verzögerungseigenschaften und Zuverlässigkeit anzubieten. Dazu werden in Abhängigkeit von dem zu erbringenden Dienst verschiedene Verfahren zur Reservierung von Netzressourcen und zur Verkehrsüberwachung eingesetzt. ATM kann verschiedene Anforderungen von Datenströmen unterstützen, das sind solche, die garantierte Zusagen verlangen, jene, die sich mit vorhersag-

barer Qualität zufriedengeben und solche, die die jeweils vorhandene Bitrate bestmöglich nutzen.

Die Übertragung mittels ATM bietet geringe, kalkulierbare Verzögerungen, die jedoch von der Netzlast und ist damit eine vielversprechende Technologie für den Datenaustausch von Echtzeitanwendungen.

Die mittels ATM realisierbaren Netze erfüllen die Basisanforderungen an ein Breitbandnetz. Ein breites Spektrum verschiedener Bandbreiten ist verfügbar. Jene Anwendungen werden unterstützt, die sensitiv gegenüber Übertragungsverzögerungen und Schwankungen der Verzögerung sind. Daneben werden auch die existierenden konventionellen Dienste weiter unterstützt.

2.4.2 ATM-Referenzmodell

Im ersten Schritt in Richtung Breitbandkommunikation in öffentlichen Netzen wurde die ATM-Technologie gewählt [RaWa97, Griff95]. Für das ATM-basierte Breitband-ISDN wurde von der ITU ein eigenes Protokollreferenzmodell geschaffen. In Abbildung 9 sind die einzelnen Schichten dargestellt. Bei den im folgenden genauer dargestellten Schichten handelt es sich um die physikalische Schicht, die ATM-Schicht und die Adaptionsschicht. Eine Einordnung dieser Schichten in den Kontext des von der ISO standardisierten OSI-Referenzmodells kann aufgrund der fehlenden direkten Entsprechung einzelner Schichten nicht vorgenommen werden.

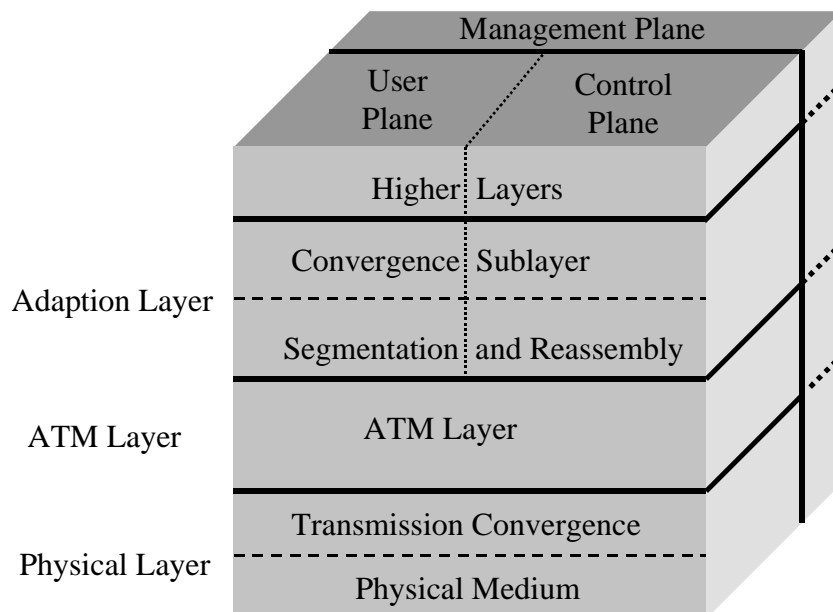


Abbildung 9: Breitband-ISDN Protokollreferenzmodell

2.4.3 Die physikalische Schicht

Die physikalische Schicht gliedert sich in zwei Teilschichten auf. Der Physical Medium Sublayer ist dabei für die Übertragung der einzelnen Bits über das entsprechende Medium zuständig. Die Definition von ATM wurde so gestaltet, daß herkömmliche Übertragungssysteme zum Transport der Zellen in den dort verwendeten Übertragungsrahmen nutzbar sind. Die ATM-spezifischen Funktionen, die noch der physikalischen Schicht zugeordnet werden,

sind in der Konvergenz-Teilschicht (TC) zusammengefaßt. Der Transmission Convergence Sublayer bewerkstelligt die Anpassung der von der übergeordneten ATM-Schicht empfangenen Bits an das Übertragungsmedium. Die ATM-Zellen werden dort in die Nutzdatenbereiche der Übertragungssignale eingefügt. Andererseits muß in dem kontinuierlichen Zellenstrom die Zellenstruktur erkannt werden, da zur ATM-Schicht bereits Zellen übergeben werden. Die Fehlersicherung für den Zellenkopf ist ebenfalls der TC-Subschicht zugeordnet. Bei Bedarf werden Stopfzellen in den Strom eingefügt und wieder entfernt, um aus dem durch das asynchrone Zeitmultiplexverfahren entstehenden unregelmäßigen Zellenstrom einen kontinuierlichen Bitstrom zu erzeugen. Anders als die ITU ordnet das ATM-Forum diese Funktion der ATM-Schicht zu.

2.4.4 Die ATM-Schicht

Die ATM-Schicht ist unabhängig von der darunterliegenden physikalischen Schicht. In der ATM-Schicht erfolgt das Verpacken der in Blöcken von 48 Byte als ATM Service Data Unit (SDU) zusammen mit zusätzlichen Steuerungsinformationen vom AAL übergebenen Daten in ATM-Zellen. Die ATM-Schicht definiert keine Sicherungsmechanismen gegen Bitfehler für die in den ATM-Zellen transportierten Nutzdaten. Nur der Zellenkopf wird gegen Fehler gesichert. In der ATM-Schicht besteht auch keine Sicherung gegen Zellverluste. Es wird von der ATM-Schicht aber garantiert, daß die Zellenreihenfolge innerhalb einer virtuellen Verbindung (Virtueller Pfad, VP oder Virtueller Kanal, VC) gewahrt bleibt. Darüber hinausgehende Sicherungsfunktionen müssen bei Bedarf vom AAL oder Protokollen höherer Schichten erbracht werden.

Diese Schicht liefert die Funktionalität zur Bearbeitung von Informationen im Zellenkopf. Eine weitere Aufgabe der ATM-Schicht ist das Multiplexen bzw. Demultiplexen von Zellen verschiedener Verbindungen zu einem einzigen Zellenstrom. Es können somit mehrere Verbindungen über einen einzigen ATM-Anschluß gleichzeitig unterhalten werden. Weiterhin ist diese Schicht in den Vermittlungsstellen für die Weiterleitung der Zellen anhand von Informationen im Zellenkopf zuständig. Die in einem Zellenkopf enthaltenen Informationen bezüglich des weiteren Übertragungsweges werden in einem Switch durch neue ersetzt, die jeweils das nächste Ziel angeben.

Virtuelle Verbindungen

Jede Verbindung der ATM-Schicht erstreckt sich zwischen je zwei Verbindungsendpunkten [UNI96]. Eine Verbindung besteht in der Regel aus einer Verkettung von Abschnitten. Virtuelle Pfade und virtuelle Kanäle werden mit Hilfe von Verbindungskennungen realisiert. Zellen einer ATM-Verbindung sind mit einer gemeinsamen Kennung versehen, die jeweils auf einem Abschnitt der Leitung eindeutig ist. Ein virtueller Kanal erlaubt den unidirektionalen Transport von Zellen mit gleicher Kennung. Das Konzept des virtuellen Pfades erlaubt es darüber hinaus, virtuelle Kanäle logisch zu einem Pfad zu bündeln. Die dem Benutzer einer ATM-Verbindung zugesagte Dienstgüte bezüglich Zellverlusten, Zellverzögerungen und Zellverzögerungsschwankungen wird beim Verbindungsaufbau festgelegt.

Statistisches Multiplexing

Zur besseren Ausnutzung von Netzressourcen wird bei ATM das Prinzip des statistischen Multiplexing [Sieg97, Zitt95] eingesetzt. Beim Statistischen Multiplexing wird die Möglichkeit ausgenutzt, Bandbreite und Pufferspeicher von mehreren virtuellen Verbindungen gemeinsam nutzen zu lassen. Dadurch kann bei der Reservierung von Netzressourcen statt von der maximalen von einer mittleren Senderate ausgegangen werden. Den Verbindungen, auf

denen Daten mit variabler Rate übertragen wird, kann somit eine hohe maximale Senderate zugestanden werden, ohne daß das Netz über Übertragungskapazitäten verfügen muß, die der Summe der maximalen Senderate aller Verbindungen entspricht. Die Steigerung der Effizienz kommt jedoch nur zustande, wenn die gemultiplexten Quellen unkorreliert sind. Zielstellung ist es, einen Kompromiß aus hoher Auslastung bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung zugesagter Dienstqualitäten zu erreichen. Optimal ließe sich das Verfahren anwenden, wenn dem Netzwerk das genaue Sendeverhalten der Quellen bekannt ist. In der Praxis kann davon jedoch nicht ausgegangen werden. Deshalb werden Methoden angewandt, die es ermöglichen, bei der Etablierung neuer Verbindungen zu überprüfen, ob noch genügend Reserven vorhanden sind. Die Überprüfung ist notwendig, um die Dienstqualität der bestehenden Verbindungen nicht zu beeinträchtigen und einer neuen Verbindung gleichzeitig die vereinbarte Qualität zu bieten.

Es können kurzzeitige Stauungen entstehen, wenn in einem ATM-Vermittlungsknoten verschiedene Datenströme über dieselbe Ausgangsleitung gesendet werden sollen. Zum Ausgleich dieser Schwankungen bzw. zur Vermeidung von durch diese Konkurrenz bedingten Verlusten verfügen die ATM-Vermittlungsknoten über Puffer. Durch das möglicherweise starke Schwanken verschiedener Quellen kann es aber dennoch vorkommen, daß nicht genügend Pufferplatz vorhanden ist. Gründe dafür, die Puffergrößen nicht über gewisse Grenzen anwachsen zu lassen, liegen in den großen Verzögerungen, die durch große Puffer entstehen, sowie der aufwendigen Ende-zu-Ende Flußkontrolle, wenn große Datenmengen zwischengepuffert werden.

Zellverluste

Die Zellenverlustrate ist eine wichtige Charakteristik einer Verbindung. Zellenverlustraten von 10^{-8} bis 10^{-9} auf Ende-zu-Ende-Sicht sind in aktuell installierten ATM-Netzen möglich und bilden einen brauchbaren Wert für die meisten Anwendungen. Für einige Anwendungen reicht aber auch diese sehr kleine Zellverlustrate oft nicht aus, so daß typischerweise Schutzmechanismen eingeführt werden müssen, welche zur Aufrechterhaltung der semantischen Richtigkeit beitragen. Ziel dieser Mechanismen ist es, Zellverluste zu erkennen und diese durch Auslösung von Übertragungswiederholungen entweder ganzer Rahmen oder einzelner Zellen zu kompensieren. Die Variante der Übertragungswiederholungen eignet sich aber lediglich für Anwendungen ohne Echtzeitanforderungen. Im Bereich der Echtzeitanwendungen kann aufgrund der zu großen Verzögerung durch die Neuaussendung nicht auf die Übertragungswiederholung zurückgegriffen werden. Dennoch benötigen diese eine Fehlererkennung und / oder eine Fehlerkorrektur während der Weiterleitung oder mindestens in den Endsystemen. Typische Methoden der Fehlererkennung basieren auf Zellennumerierungen modulo N. Damit können Verluste von N-1 aufeinanderfolgenden Zellen erkannt werden. Daneben existieren eine Reihe von Prinzipien der sogenannten Forward Error Correction (FEC). Diese basieren in der Regel darauf, daß zusätzlich zu den in den Zellen vorhandenen Nutzdaten redundante Daten übertragen werden, mit deren Hilfe es möglich wird, Zellverluste bis zu einem gewissen Grad durch Rekonstruktion der Zellen auszugleichen.

ATM-Dienstkategorien

Vom ATM-Forum [UNI94], der stark anwenderorientierten Vereinigung zur Förderung von ATM, wurden entsprechend definierten Klassen ATM-Dienste, die von der ATM-Schicht bereitgestellt werden, präzisiert. Diese sollen im folgenden dargestellt werden [TM4]. Die ATM-Schicht liefert fünf Dienstkategorien entsprechend der folgenden Tabelle.

Echtzeit-Verkehrskategorien	Nicht-Echtzeit-Verkehrskategorien
CBR	NrtVBR
RtVBR	UBR
	ABR

Tabelle 2: Verkehrskategorien (nach ATM-Forum Definition)

CBR- (Constant Bit Rate) Die Dienstkategorie CBR ist für Anwendungen zugeschnitten, die über die gesamte Dauer der Übertragung eine statische Bandbreite verlangen. Das Netzwerk sichert nach erfolgreicher Vertragsverhandlung diese Bandbreite allen Zellen zu, über die gesamte Dauer der Verbindung. Gegenüber der Netzwerkschnittstelle (UNI) signalisiert die Anwendung ihre Anforderungen mittels der Peak Cell Rate (PCR). Damit kann die Anwendung Zellen mit der Spitzenzellenrate oder mit einer Rate kleiner dieser in das Netz schicken. Ein weiterer Leistungsparameter wird während der Signalisierungsphase ausgehandelt, die maximale Zellenverzögerung (max Cell Transfer Delay, maxCTD) über die gesamte Distanz zwischen Anfangs und Endpunkt der Verbindung. Stark verspätete Zellen, die nach Verstreichen der maximalen Zellenverzögerung eintreffen, werden als wertlos für die Applikation angesehen. Der CBR-Dienst unterstützt Echtzeitanwendungen, die hohe Anforderungen an das Eintreffen der Dateneinheiten in gleichmäßigen Abständen stellen.

rtVBR- (real time Variable Bit Rate) ist gekennzeichnet durch definierte PCR, die andauernd erlaubte Zellen- Rate (Sustainable Cell Rate, SCR) und Maximum Burst Size (MBS). Bezüglich der Anforderungen an die Übertragungsverzögerung gilt gleiches wie bei CBR. Von den Anwendungen wird angenommen, daß sie mit einer schwankenden Rate, d.h. burstartig senden. Stark verspätete Zellen ($> \text{maxCTD}$) werden auch hier als wertlos für die Applikation angesehen.

nrtVBR- (non real time Variable Bit Rate) Diese Dienstkategorie wurde für Nicht-Echtzeit-Anwendungen gedacht, die eine burstartige Verkehrscharakteristik haben. Deren Datenströme werden durch PCR, SCR und MBS charakterisiert. Ansprüche an Verzögerungsgrenzen bzw. Schwankungen der Übertragungsverzögerung sind mit dieser Dienstkategorie nicht assoziiert. Die Anwendung erwartet eine geringe Anzahl durch das Netz verworfener Zellen.

UBR- (Unspecified Bit Rate) Diese Dienstkategorie ist beabsichtigt für Nicht-Echtzeit-Anwendungen, die nur geringe Ansprüche an die Übertragungsverzögerung stellen. Der UBR-Dienst spezifiziert keine verkehrsbezogenen Dienstgarantien. Es erfolgen daher auch keine numerischen Zusicherungen durch das Netz in Bezug auf die Zellenverlustrate (Cell Loss Ratio, CLR) und die Zellenübertragungsverzögerung, CTD. Die Anwendung verlangt hierbei lediglich Best-Effort-Qualität.

ABR- (Available Bit Rate) Die Verkehrs-Charakteristik von ABR wird durch eine schwankende, dem Netz zum jeweiligen Zeitpunkt verbleibende freie Übertragungskapazität induziert, welche der Anwendung durch Rückkopplung jeweils signalisiert wird. Eine Anwendung, die mit einer der Signalisierung entsprechenden Rate sendet, kann mit einer geringen Verlustrate ihrer emittierten Zellen rechnen. In der Konsequenz sind von der Anwendung keine Anforderungen an Verzögerung und deren Schwankungen zu stellen. Der ABR-Dienst unterstützt damit keine Echtzeit-Anwendungen. Im Zuge des Verbindungsaufbaus definiert

die Anwendung eine maximal geforderte Bandbreite mittels PCR und eine minimal genutzte Bandbreite mittels MCR (Minimum Cell Rate). Die MCR kann hierbei auch als null spezifiziert werden. Die vom Netz angebotene Bandbreite variiert im Laufe der Übertragung, fällt jedoch nicht unter die MCR.

Zeitbezogene Dienstqualitäts-Parameter	Mengenbezogene Dienstqualitäts-Parameter
CDV	Cell Loss Ratio
CTD	Cell Error Ratio
	Severely errored Cell Block Ratio
	Cell Misinsertion Rate

Tabelle 3: Parameter der Dienstqualität

- **Cell Error Ratio:** Die Zellenfehlerrate ist definiert als das Verhältnis von fehlerhaft beim Empfänger ankommenden Zellen zur Gesamtzahl der ausgesendeten Zellen.
- **Severely-Errored-Cell Block Ratio:** Faßt man eine Sequenz von N Zellen zu einem Block zusammen und werden von diesen Zellen M Stück fehlerhaft, so gilt dieser Block als beschädigt.
- **Cell Loss Ratio:** Die Zellenverlustrate ist definiert als das Verhältnis von verlorenen Zellen zur Gesamtzahl der übertragenen Zellen.
- **Cell Misinsertion Rate:** Eine falsch eingefügte Zelle ist meistens auf einen fehlerhaften Zellenkopf zurückzuführen. Der Parameter gibt die Zahl der falsch eingefügten Zellen pro Zeiteinheit an.
- **Cell Transfer Delay:** Der Parameter ist definiert als die Zeitdifferenz zwischen dem Aus-senden einer Zelle und dem Empfang derselben Zelle am Empfänger. Die Verzögerung beinhaltet sämtliche Bearbeitungszeiten innerhalb von ATM-Knoten, welche die Zelle pa-siert und die Übertragungszeit.
- **Mean Cell Transfer Delay:** Dieser Parameter gibt den arithmetischen Durchschnitt einer Anzahl von Transfer Delays für eine Verbindung an.
- **Cell Delay Variation:** Durch diesen Parameter wird die Differenz zwischen der erwarteten Ankunftszeit einer Zelle bezogen auf die definierte Spitzenzellenrate und der tatsächlichen Ankunftszeit und gibt damit Aufschluß darüber, ob die Zellen innerhalb des Stromes dichter zusammengedrängt werden oder im Laufe der Übertragung Lücken entstanden sind.

In der aktuellen Version der Spezifikation sind 3 der Parameter aus Tabelle 3, peak to peak CDV, maxCTD, CLR, im Laufe des Verbindungsaufbaus verhandelbar.

2.4.5 Die Adaptionsschicht

Die ATM-Adaptionsschicht ist für die Anpassung der Dienste der ATM-Schicht auf die Anforderungen der Protokolle höherer Schichten zuständig. Die verschiedenen Anforderungen der Datenübertragung werden vom AAL auf ATM-Zellen abgebildet und aus den empfangenen Zellen werden die Nutzdaten wiederhergestellt. Zusätzlich können in der AAL-Schicht Protokollmechanismen auf Basis einzelner Zellen oder auf Basis der Dienstdateneinheiten (Adaptionsschichtrahmen) zum Einsatz kommen, um erweiterte Dienste wie Zuverlässigkeit oder Zeitbeziehung zu realisieren. Der AAL ist in zwei Einheiten unterteilt. Dabei ist der Convergence Sublayer noch einmal in eine dienstunabhängige und eine dienstspezifische

Schicht unterteilt und stellt spezielle Funktionen wie die Bereitstellung von Zeitinformationen zur Verfügung. Die eigentliche Umsetzung der von höheren Schichten übermittelten Daten in einen Zellenstrom wird im Segmentation and Reassembly Sublayer (SAR) durchgeführt. Hierbei wird auf der Senderseite die Segmentierung und auf der Empfängerseite der umgekehrte Vorgang vorgenommen. Von den AAL existieren verschiedene Typen, die zur Unterstützung verschiedener Anwendungen entworfen wurden. Jeder AAL fügt innerhalb des ATM-Zelleninformationsfeldes weitere Steuerinformationen hinzu, die der Empfängerinstanz das korrekte zusammensetzen der Nutzdaten ermöglichen.

Dienstklassen

Dem Nutzer einer ATM-Verbindung wird eine Anzahl von QoS-Klassen durch das Netz zur Verfügung gestellt. Dabei kann eine Verbindung Kanäle (VC) verschiedener Klassen transportieren. Die QoS-Klasse wird während der Verbindungsaufbaus vereinbart und ändert sich im Verlauf der Übertragung nicht.

	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
Bitrate	Konstant	Variabel	Variabel	Variabel
Zeitbeziehung	Erforderlich	Erforderlich	nicht benötigt	nicht benötigt
Verbindungsart	Verbindungsorientiert	Verbindungsorientiert	Verbindungsorientiert	Verbindungslos

Tabelle 4: ATM-Dienstklassen (nach ITU-T Definition)

Anwendungsbeispiele für die vier Dienstklassen A bis D sind:

- A: Sprachübertragung und Videoübertragung mit konstanter Datenrate (isochron)
- B: Videoübertragung mit variabler Datenrate, Synchronisation wird von der AAL-Schicht verlangt
- C: Datenübertragung mit großem Volumen, Zeitbeziehung wird durch höhere Schichten realisiert.
- D: Datenübertragung mit Datagrammen

Für die einzelnen Dienstklassen sind unterschiedliche Ausprägungen der Adaptionsschicht definiert. Die Typen AAL 1 bis AAL 4 realisieren jeweils eine der Dienstklassen. Aus Gründen der Vereinfachung und besonders auf Druck der Industrie wurde ein fünfter AAL-Typ definiert, der sich an AAL 3 und AAL 4 anlehnt und sich darüber hinaus durch leichte Implementierbarkeit auszeichnet. Nachfolgend werden die einzelnen AAL näher charakterisiert.

Adaptionsschichttypen

- **AAL 0:** Bei diesem AAL-Typ werden in der AAL-Schicht keine Funktionen ausgeführt. Übertragungsmechanismen, die bereits ihre Dateneinheiten in Zellen aufgeteilt haben, können diesen AAL-Typ verwenden, da sie keine Anpassung benötigen.
- **AAL 1:** Dieser AAL-Typ der Anpassungsschicht wird zur Datenübertragung mit konstanter Bitrate verwendet. Die Nutzdaten werden der AAL-Schicht mit konstanter Länge und konstantem Zeitabstand übergeben. Auf der Empfängerseite werden diese mit konstanter Länge und Abstand an die höheren Schichten übergeben. Dieselbe Bitrate des

Senders wird taktsynchron am Zielknoten wieder zur Verfügung gestellt. Dazu wird neben den Daten auch die Taktinformation vom Sender zum Empfänger übertragen. Zur Fehlerkontrolle wird jede Zelle mit einer Sequenznummer versehen. Die Zellensequenznummer wird im Payload-Teil übertragen und durch eine Prüfsumme gesichert. Von der ITU-T wurden in der Spezifikation I.363 für die CS-Subschicht Festlegungen getroffen, die Reaktionen auf Bitfehler, Zellverluste, Zelleinfügungen und den Ausgleich der Verzögerungsschwankungen betreffen. Die SAR-Teilschicht führt die Abbildung der CS-PDUs auf die 48 Byte langen SAR-PDUs durch. Die Zellreihenfolge wird durch die Funktionen der ATM-Schicht gesichert. Diese sichert jedoch nicht das Erkennen des Verlusts von Zellen. Dazu wird in der SAR-Teilschicht den Nutzdaten eine Sequenznummer vorangestellt. Diese Sequenznummer wird bei AAL 1 zusätzlich noch durch eine Prüfsumme gesichert. Das Kopffeld der SAR-PDU ist insgesamt ein Byte lang. Abbildung 10 zeigt das Format einer SAR-PDU. Für die Nutzlast der SAR-PDU bleiben damit 47 Byte.

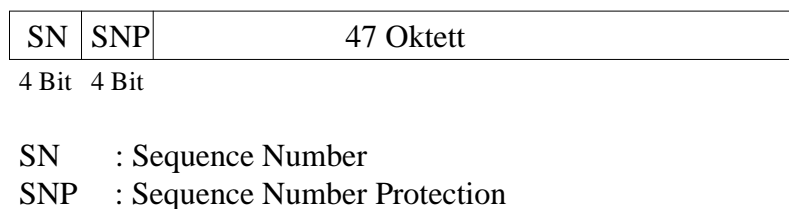


Abbildung 10: Format der SAR-PDU bei AAL1

- **AAL 2:** Die Anpassungsschicht des Typs 2 gestattet die Übertragung von Datenströmen mit variabler Bitrate, wobei wie bei AAL 1 eine zeitliche Beziehung zwischen Sender und Empfänger berücksichtigt wird. Da die Quelle eine variable Bitrate erzeugt, ist es möglich, daß Zellen nicht vollständig gefüllt werden und der Füllstand von Zelle zu Zelle schwankt. Eine SAR-Teilschicht ist für diesen AAL-Typ nicht vorgesehen. Der Convergence Sublayer besteht aus zwei Teilschichten, dem Service Specific (SSCS) und dem Common Part (CPS). Der AAL-Diensttyp 2 unterstützt mehrere Anwendungsverbindungen innerhalb einer AAL-2-Verbindung. Die einzelnen Anwendungsverbindungen werden durch unterschiedliche Channel-Identifizier (CID) im CPS-Kopffeld differenziert. Mit dem Längen-Indikator wird die Länge des Payload-Feldes eines CPS-Paketes festgelegt. Die CPS-Pakete werden als CPS-PDUs durch ATM-Zellen im Payload-Teil der Zelle transportiert. Hierzu wird ein zusätzliches Startfeld (STF) vor dem eigentlichen CPS-Paket hinzugefügt. Im Startfeld wird durch das Offset-Feld (OSF) die Anzahl der Oktett zwischen diesem Feld und dem Beginn des CPS-Paketes angegeben. Eine Sequenznummer numeriert die einzelnen CPS-PDUs und mit einem Parity-Bit wird das Startfeld schließlich gesichert. Dieser Ausprägung der Anpassungsschicht ist jedoch derzeit nur eine untergeordnete Rolle zugeordnet.
- **AAL 3/4:** Typen 3 und 4 der Anpassungsschicht spezifizieren die verbindungsorientierte und verbindungslose Übertragung von Datenpaketen. Es sind ein Streaming Modus und ein Message Modus definiert. Bezüglich des Funktionsumfanges wird eine ungesicherte Übertragung geboten. Verfälschte oder verlorene Dateneinheiten werden im Fehlerfall nicht wiederholt. Diese nicht korrekten Dateneinheiten können verworfen werden oder trotzdem an die höhere Schicht weitergeleitet werden. Im Message Modus werden die AAL-SDUs in einem Stück an den AAL übergeben. Bevor diese Dateneinheiten an die

unteren Teilschichten des AAL weitergegeben werden, können die innerhalb der AAL segmentiert oder zusammengefaßt werden. Im Streaming-Modus werden die AAL-SDUs in mehreren Teilen zwischen den höheren Schichten und dem AAL ausgetauscht. Dadurch hat der AAL die Möglichkeit, mit dem Senden bereits zu beginnen, bevor die gesamte AAL-SDU übergeben wurde. In diesem Falle werden die Verzögerungen minimiert, die besonders bei langen SDUs auftreten. Andererseits können auf der Empfangsseite bereits Teile der SDU eingetroffen sein, bevor das letzte Teilstück auf der Senderseite bearbeitet wurde. Abbildung 11 zeigt das Format der CPCS-PDU des AAL-Typ 3/4. Eine CPCS-Dateneinheit kann länger als das Payload-Feld der SAR-Dateneinheit sein und muß daher möglicherweise auf mehrere SAR-Dateneinheiten aufgeteilt werden. Im SAR-Header wird die Segmentierungseinheit als im Feld ST mit BOM (Begin of Message) gekennzeichnet. Weitere Segmentierungseinheiten erhalten die Kennzeichnung COM (Continuation of Message). Die letzte erhält schließlich EOM (End of Message) als Signatur. Ein einzelnes Segment wird durch SSM (Single Segment Message) gekennzeichnet. Bei der Übertragung der Nutzdaten mit dem Diensttyp 3/4 können maximal 44 Byte der Nutzdaten je Zelle übertragen werden. (Abbildung 12). Die Sequenznummer SN ermöglicht das Erkennen fehlender Zellen.

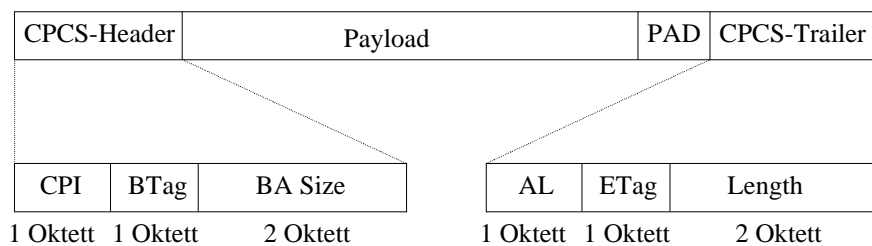


Abbildung 11: AAL 3/4 CPCS - Dateneinheit

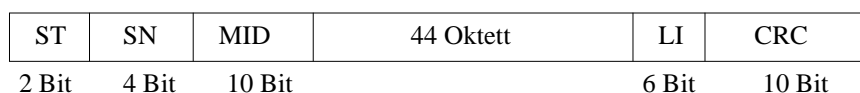


Abbildung 12: AAL 3/4 SAR-PDU

- AAL 5:** Aufgrund des erheblichen Overheads der Protokolle des AAL 3/4, der fast zehn Prozent des Informationsfeldes jeder Zelle belegt, wurde ein einfacherer AAL Typ 5 definiert. Die Vereinfachung wurde hauptsächlich dadurch erreicht, daß die Funktionen der SAR-Teilschicht, die einen Overhead pro Zelle erzeugen, in die CPCS Teilschicht verlagert wurden, wo der Overhead lediglich einmal für jede in der Regel sehr viel längere CPCS-PDU anfällt. Die CPCS-PDU des AAL Typ 5 verfügt über kein Kopffeld, so daß an das bis zu 65535 Byte lange Nutzlastfeld lediglich ein Anhang von 8 Byte angefügt wird. Mittels eines PAD-Feldes wird die Länge einer CPCS-PDU auf ein Vielfaches von 48 Byte erweitert. Ein Längenindikator wird wie beim AAL-Typ 3/4 dazu verwendet, um die Länge des Nutzlastfeldes zu übermitteln. Beim AAL 5 werden alle Zellen, mit Aus-

nahme der letzten, mit den möglichen 48 Byte Nutzdaten gefüllt [I.363]. Die SAR-Teilschicht belegt keine Bits im Datenfeld einer ATM-Zelle.

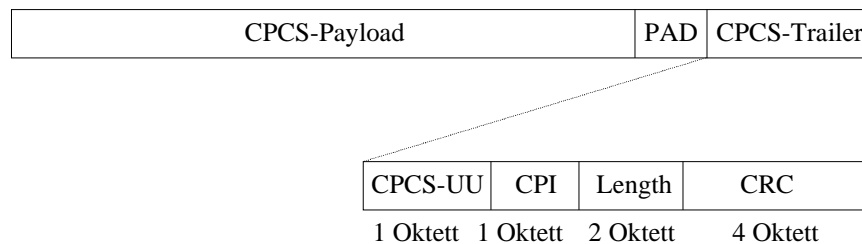


Abbildung 13: AAL 5 CPCS Dateneinheit

Sie verwendet aber im Zellenkopf einen Teil des Payload Type Feldes, um zwischen dem Beginn oder der Fortsetzung eines SAR-Segmentes und dem Ende dieses zu unterscheiden. Zwischen CPCS und SAR-Teilschicht werden nur Dateneinheiten ausgetauscht, deren Länge ein ganzzahliges Vielfaches von 48 Bytes ist. Dadurch entfällt der Längenindikator aufgrund der vollständigen Füllung der Zellen. Auf die Reihenfolgesicherung der SAR-PDUs wird verzichtet und die Sicherung gegen Übertragungsfehler in der CPCS-Schicht durchgeführt.

2.4.6 ATM-Vermittlungstechnik

Zentrale Elemente von ATM-Netzwerken sind die Schalteinheiten (ATM-Switch). Ihnen kommt die Aufgabe zu, die Informationen in den Köpfen eintreffender Zellen aufzunehmen und auf Basis dieser Informationen jede Zelle an den entsprechenden Ausgangsport weiterzuleiten [Coov97]. Dazu existiert zwischen den Ports ein Schaltnetzwerk, das verschiedenartig ausgeprägt sein kann. Aus vermittlungstechnischer Sicht bildet dieses Schaltnetzwerk das Kernstück einer ATM-Schalteinheit. Der Durchsatz eines ATM-Switches ist im Bereich von mehreren Gbit/s und die reine Durchschaltverzögerung des Schaltnetzwerkes ohne Berücksichtigung der Warteschlangen ist mit 13–34 μ s [Coov97, Almu99] sehr klein gehalten. Eigene Messungen an einem verfügbaren ATM-Switch LS 1010 der Firma Cisco Corp. ermittelten 25 μ s.

Das Hauptproblem, das an den Switches auftritt, ist die mögliche Blockierung. Diese tritt dann auf, wenn zwei oder mehr an einem Switch ankommende Zellen auf denselben ausgehenden Link weitergeleitet werden müssen. In diesem Fall kann nur eine der Zellen ohne Verzögerung weitergeleitet werden. Als Folge der Blockierung kann es bestenfalls zu einer Verzögerung der blockierten Zellen kommen, wobei die blockierten Zellen in Zwischenspeichern oder Warteschlangen abgelegt werden. Wenn auch deren Kapazität erschöpft ist, sind Zellverluste unvermeidbar. Es existieren zur Lösung dieses Problems mehrere Wege, die von Herstellern bei bereits verfügbaren Switches unterschiedlich angewendet werden.

Eingangspuffer

Beim Einsatz von Eingangspuffern werden Zellen bereits vor dem Durchgang durch das Schaltsystem im ATM-Switch gepuffert. Konkurrieren mehrere Zellen um einen Ausgangsport, so werden bis auf eine alle Zellen geblockt und in die jeweiligen Warteschlangen an ihren Eingangsport gestellt. Nachteilig wirkt sich aus, daß Zellen, die nach einer geblockten Zelle in einer FIFO Warteschlange stehen, auch aufgehalten werden, obwohl ihr Ausgangsport möglicherweise frei ist (head of line blocking). Daher empfiehlt sich der Einsatz nicht als

FIFO organisierter Warteschlangen, z.B. mit beliebigem Zugriff, wodurch die Verwaltung aber komplizierter wird.

Ausgangspuffer

Bei Systemen, die Ausgangspuffer verwenden, haben die Zellen bereits das Vermittlungssystem passiert, wenn diese auf Zellen treffen, die mit ihnen um denselben Ausgangsport konkurrieren. Auch hier kann nur eine Zelle sofort abgesendet werden. Andere werden in die Ausgangswarteschlange eingereiht. Jedem Ausgang steht ein vorgegebener Puffer zur Verfügung, in dem eine Anzahl Zellen gespeichert werden können, die gleichzeitig am Ausgangsort ankommen. Das System muß in der Lage sein, während einer Zellperiode alle am Ausgangsport ankommenden Zellen gleichzeitig in die Warteschlange zu schreiben. Die Steuerung der Ausgangswarteschlangen basiert auf dem FIFO-Prinzip, so daß sichergestellt ist, daß die Zellen ihre Reihenfolge behalten.

Zentraler Puffer

Eine zentral angelegte Warteschlange ist nicht nur für einen einzelnen Eingangs- oder Ausgangsport vorgesehen, sondern steht allen Ports zur Verfügung. Jede eintreffende Zelle wird unmittelbar in der Warteschlange gespeichert. Von jedem Ausgang werden die ihn betreffenden Zellen mittels eines FIFO-Prinzips aus dem Speicher entnommen. Für das Auffinden der einzelnen Zellen und die Entnahme durch die Verarbeitungsfunktion des Ausgangsports muß eine recht komplizierte Speicherverwaltungsfunktion vorhanden sein.

Die beschriebenen drei Alternativen zeigen verschiedenes Verhalten im Hinblick auf die Verzögerung und potentielle Zellverluste. In der Praxis finden auch Kombinationen aus den vorgestellten Pufferungsmechanismen Verwendung. Darüber hinaus spielt die Dimensionierung der Zellpuffer eine wichtige Rolle, auch bei den verschiedensten Lastsituationen leistungsstarkes Verhalten zu zeigen. Zahlreiche Forschungsarbeiten befaßten sich mit den Themen adäquater Dimensionierung der Zellpuffer in den Switchen und Strategien der Verbindungsannahme durch die Switches [LiSu98, KuTh99, Wen98, WuCh99].

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß den Schalteinheiten als Hauptaufgabe obliegt, dynamisch Übertragungswege zwischen den Eingangsports und den Ausgangsports herzustellen. Dies gilt unter den Prämissen, es möglichst schnell zu tun, dabei wenig Konflikte auftreten zu lassen und Verluste zu vermeiden.

2.4.7 Signalisierung

Die Signalisierung umfaßt Funktionen zum Aufbau und Abbau von Verbindungen, der Bereitstellung von Netzressourcen. Zur Verbindungsverwaltung wird das Prinzip der „Out of Band“-Signalisierung angewandt. Die Instanzen der Signalisierung sind in der Steuerungsebene oberhalb der Adaptionsschicht angesiedelt. Zur Übertragung von Signalisierungsnachrichten werden ebenfalls virtuelle Verbindungen eingesetzt, die entweder mit Hilfe einer Meta-Signalisierung aufgebaut werden oder netzspezifisch festgelegt wurden.

Zwischen den Endsystemen und der ersten Vermittlungsstelle findet eine etwas andere Signalisierung (UNI) als zwischen den Vermittlungsstellen (NNI) statt. Für beide bestehen getrennte Standards.

Der Aufbau einer einfachen Punkt-zu-Punkt-Verbindung wird durch eine SETUP-Meldung an das UNI eingeleitet. Die SETUP-Meldung enthält alle für den Verbindungsaufbau notwendigen Informationen. Dies sind die Zieladresse, die Informationen über den angeforderten

Dienst (Dienstgüteparameter des Verkehrsvertrages), den AAL-Typ und optional weitere Parameter. Die netzseitige Signalisierungsinstanz prüft die Verfügbarkeit der angeforderten Ressourcen und unterrichtet die anfordernde Instanz darüber, daß der Verbindungsaufbau eingeleitet worden ist. In gleicher Weise werden alle zu passierenden Vermittlungssysteme (Switches) in den Prozeß einbezogen, bis der gerufene Teilnehmer erreicht ist. Wenn dieser den Verbindungswunsch annimmt, wird dies der rufenden Seite übermittelt. Daraufhin ist die Verbindung erfolgreich etabliert.

2.4.8 Mehrpunktkommunikation in ATM-Netzen

ATM gestattet es, neben Punkt-zu-Punkt auch Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen aufzubauen. Bei diesem Verbindungstyp ist aber auch nur ein unidirektionaler Transfer von Daten ausgehend von einem Sender zu den Empfängern möglich. Damit einhergehend muß wie bei Punkt-zu-Punkt-Verbindungen eine schlechte Skalierbarkeit in Kauf genommen werden, da für die Kommunikation in Gruppen hierzu von jedem Sender zu jedem Empfänger eine Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung aufgebaut werden muß. Hinzu kommt, daß diese bei dynamischen Änderungen der Gruppen von jedem Sender verändert werden müssen. Die Prozeduren zum Aufbau, dem Hinzufügen und Entfernen von Konten der Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen sind in [UNI96] beschrieben.

2.4.9 Zusammenfassung der Vorteile von ATM

In diesem Abschnitt sollen die charakteristischen Eigenschaften zusammengefaßt werden, die ATM für die angestrebte Kopplung von PROFIBUS-Segmenten geeignet erscheinen lassen. Entsprechend der Aufgabenstellung im Rahmen dieser Arbeit soll ATM als Übermittlungstechnik dienen, welche die Funktion eines Backbone zur Verbindung von PROFIBUS-Inseln übernehmen kann. Von der Technik, die als Backbone eingesetzt werden soll, wird der echtzeitnahe, möglichst verlustfreie Datentransport verlangt. ATM kann eine solche Rolle übernehmen, denn seine Fähigkeit, Dienstqualitäten zu garantieren, prädestiniert seinen Einsatz. ATM wird als spezieller paketerientierter Übertragungsmodus angesehen, der auf asynchronem Zeit-Multiplexverfahren und dem Einsatz von Zellen fester Länge beruht. Verschiedenste Verkehrsströme (Ton, Bild, Daten) können mittels ATM befördert werden. ATM arbeitet verbindungsorientiert. Aus der Übertragung in Zellen resultieren einige wesentliche Eigenschaften von ATM. Durch die einheitliche Länge entsteht eine kalkulierbare Verzögerung bei der Übertragung beliebiger Informationen, wodurch auch bei mehreren konkurrierenden Datenströmen für die einzelnen Anwendungen garantierte Bandbreiten vergeben werden können. Die Übertragung selbst basiert auf dem Prinzip der virtuellen Verbindungen. Bei den Verbindungen kann es sich um Punkt-zu-Punkt oder Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen handeln. Verbindungen können mit einer vereinbarten Dienstqualität (Quality of Service) aufgebaut werden. Dabei wird versucht, den jeweiligen Anforderungen bestmöglich gerecht zu werden. Mit den diskutierten Einschränkungen wird ein berechenbares Echtzeitverhalten geboten. ATM ist damit die vielversprechendste Technologie zur Übertragung von Datenströmen mit harten Zeitanforderungen, wie sie bei PROFIBUS verlangt werden.

Nur für die Dauer der Kommunikation oder auch permanent können Verbindungen etabliert werden. In der Phase des Verbindungsaufbaus erfolgt auch die Zuweisung der von der Anwendung benötigten Ressourcen, die vom Netz daraufhin reserviert werden. Ein Satz von Qualitätsparametern, welche die Verbindung charakterisieren wird zwischen Anwendung und Netz ausgehandelt. Die Dienstqualität einer Verbindung bezieht sich auf den Zellenverlust, die Verzögerung und die Schwankung der Verzögerung, welche die Zellen dieser Verbindung erleiden.

Die den konformen Verbindungen garantierbare Dienstqualität stellt das wichtigste Auswahlkriterium dar. Darüber hinaus gab die Flexibilität von ATM bei zu überbrückenden Distanzen den Ausschlag, die Kopplungsmöglichkeiten von PROFIBUS-Segmenten über ein ATM-Backbone-Netz detailliert zu untersuchen.

2.5 Aktuelle Entwicklungen im Bereich des PROFIBUS

In jüngster Vergangenheit kamen innerhalb der Automatisierungstechnik Bestrebungen auf, auch Synergien aus der Verknüpfung von PROFIBUS und Ethernet in Verbindung mit der TCP/IP-Protokollwelt ziehen zu wollen [Prit99]. Es steht einerseits der Einsatz von Ethernet in der Feldebene zur Diskussion und andererseits der nahtlose Übergang von Ethernet zu PROFIBUS in vertikaler Sicht. Von der PROFIBUS-Nutzerorganisation wird deshalb die offene, transparente Kopplung zu Ethernet propagiert [PNO99].

In der Feldebene geht es primär um die schnelle Übertragung relativ kleiner Datenmengen im Bereich von wenigen Bytes. Das gesamte Grundkonzept von PROFIBUS ist darauf optimiert. Unter den Herstellern besteht jedoch Konsens darüber, daß für die zeitkritischen Steuerungsaufgaben in der Sensor-/Aktorebene auch weiterhin ausschließlich konventionelle Feldkommunikationssysteme wie PROFIBUS oder CAN eingesetzt werden [Kall99]. Auch von Furrer in [Furr98] wird diese Meinung vertreten. Ethernet wird auch weiterhin bei der Unternehmenskommunikation den Ebenen oberhalb der Feldebene vorbehalten bleiben, jedoch mittels Gateways [Soft99] Zugang zur Feldebene erlangen.

Die Anbindung von PROFIBUS an Ethernet und zugleich auch die Internet-Protokollwelt zu suchen, resultiert aus der beherrschenden Stellung der Protokolle des Internet und deren starker Durchdringung der gesamten Netzwelt. Der Nutzen, der daraus gezogen werden kann, fußt besonders auf der Verwendung der vielfältigen Dienste, die darauf beruhen. Es wird möglich, heutige und zukünftige Anwendungen der Produktionstechnologie mit den unternehmensweiten Informationssystemen zusammenzuschalten [Herg99, Furr98]. Damit werden optimale Lösungen für die Bereiche Fernüberwachung und -bedienung, Ferndiagnose und Zugriff auf Betriebsdaten erschlossen.

Die PROFIBUS-Nutzerorganisation treibt diesbezüglich bereits die Spezifikation eines azyklischen Dienstes auf der Basis von TCP/IP voran [PNO99]. Damit werden PROFIBUS und Ethernet zusammenwachsen. Die Vorteile von Ethernet auf der Steuerungsebene werden kombiniert mit den positiven Eigenschaften, die der PROFIBUS auf der Feldebene mitbringt. In Deutschland betrug der Marktanteil von PROFIBUS nach einem Pressebericht der PROFIBUS User Group [Prof99] 1998 etwa 48%. Etwas geringere Marktanteile, aber eine ähnlich beherrschende Stellung nehmen PROFIBUS-Installationen in anderen europäischen Ländern ein. Auch in den Vereinigten Staaten nimmt PROFIBUS, hier besonders in der Variante DP, den ersten Rang bei den im Jahre 1998 installierten Knoten ein.

Die Grenze zwischen automatisierungstechnischen Funktionen (Prozeßleittechnik) und der unternehmensweiten Informationstechnik wird immer undifferenzierter. Sie kann nur noch funktional bei den Aufgaben des Steuerns und Regelsns sowie bei der Erfüllung von Echtzeitaufgaben definiert werden [TaDr98]. Parallel zu dieser Entwicklung dringt die Internet-Technologie in die Leittechnik und weite Teile des unternehmensweiten Informationsverbundes vor [Wehr98]. Die Produktionsleittechnik liefert Informationen über den Produktionsprozeß und die Produkte und setzt Vorgaben aus den hohen Unternehmensschichten in der Produktion um. Sie ist damit Teil der prozeßnahen Informationstechnik. Auch die Sichtweise auf

die unternehmensweite Kommunikation ist dadurch im Wandel begriffen. Abbildung 14 stellt die bisherige Sichtweise, die komponentenorientiert geprägt war, der zukünftig netzorientierten Sichtweise gegenüber. Prinzipiell sind in beiden Sichten dieselben Komponenten vorhanden. Die netzorientierte Sichtweise trägt jedoch der zunehmenden Bedeutung der Kommunikationssysteme Rechnung. Gleichzeitig läßt dies das Verlangen nach einem Informationsfluß über Ebenen hinweg deutlich werden. Die Bedeutung der Übergänge von einer Ebene in die andere rückt stärker ins Blickfeld. Nicht zuletzt stehen die Koppellemente (KE) in Abbildung 14 für die zukünftig noch relevanter werdenden Übergänge zwischen den einzelnen Ebenen und deren spezifischer Kommunikationssysteme [TaDr98].

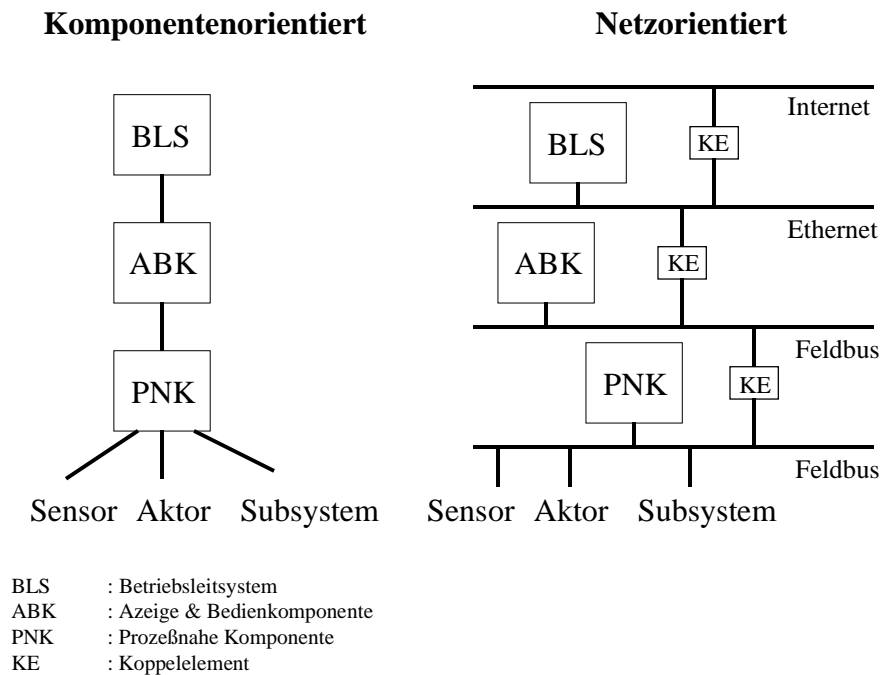


Abbildung 14: Sichtweisen auf die Unternehmenskommunikation

Es bleiben jedoch trotz veränderter Sichtweise und ebenenübergreifender Kommunikationswünsche eine Reihe von noch zu lösenden Problemen, die sich um den Informationsaustausch über Ebenen hinweg drehen. Im Bereich der Leitsystemebene herrscht in der Schicht 2 Ethernet als Kommunikationssystem. Seine mangelnden Fähigkeiten in Bezug auf die Bereitstellung von Dienstqualitäten für entsprechend zu privilegierende Anwendungen zu kompensieren, wird versucht, soviel Bandbreite zur Verfügung zu stellen, daß ernsthafte Probleme wegen der großen Summenbandbreite des Gesamtnetzes gar nicht auftreten können [Schu99]. Ein zweiter Trend geht in Richtung Mikrosegmentierung bis hin zu „dedicated Ethernet“, wobei jeder Teilnehmer über die volle Kapazität von 10, 100 Mbit/s oder 1 Gbit/s verfügen kann und der Datenaustausch kollisionsfrei abläuft. Dazu ist aber eine sternförmige Verkabelung der Teilnehmer notwendig, was mit einer Abkehr von der in der Praxis etablierten Linientopologie verbunden ist. Der Mehraufwand dadurch ist nicht unerheblich.

Im Bereich der Feldbusanwendungen treten die Eigenschaften verteilter, nebenläufiger Systeme, welche sich durch dynamische Ablaufmuster auszeichnen, stark hervor. Das prinzipielle Problem bei der Konfiguration solcher Anwendungen ist die Auflösung der Kommunikationsbeziehungen, die durch räumliche Verteilung der Anwendung entstehen. Hier gilt es,

Datenflüsse zu synchronisieren, Ausführungszeiten aufeinander abzustimmen, was durch die Verbindung von Feldbussegmenten miteinander realisiert werden kann.

Das volle Potential der Feldbus-Technik wird nur dann ausgeschöpft, wenn zur Konfiguration der Feldbusgeräte eine Station des Produktionsleitsystems genutzt werden kann. Dies bedeutet, die Konfigurationsdaten werden durch die prozeßnahen Komponenten hindurch in die Feldgeräte geladen [TaDr98]. An aktuelle Kommunikationssysteme im Automatisierungsbereich wird diese Anforderung gestellt.

Die im folgenden näher betrachteten Varianten der Einbringung von Ethernet und TCP/IP in die Feldebene sind aktuell Gegenstand der Diskussion.

A) Durchgängige Internet Protokollwelt über Ethernet

Der Zielstellung, auch von der Prozeßleitebene steuernd auf die Komponenten der Feldebene zugreifen zu können, entspricht der in Abbildung 15 gezeigte Ansatz [Schu99, TaDr98]. Auf der Schicht 2 kann Ethernet bis auf die Sensor- / Aktorebene das durchgängig verwendete Protokoll bilden [Swal98]. Mit Hilfe des Internet Protokolls (IP) wird über Router hinweg der Zugriff auf die verschiedenen Komponenten auch ebenenübergreifend ermöglicht. Die unter C) gezeigte Variante, die PROFIBUS-Anwendungsschicht auf TCP/IP und Ethernet aufzusetzen, wird unter Inkaufnahme der dort diskutierten Abstriche die Implementierung von PROFIBUS-Anwendungen über Ethernet gestatten. Zur Zeit ist die Arbeitsgruppe WG 7 des Technischen Komitees 2 der PROFIBUS Nutzerorganisation [PNO99] mit der Aufgabe betraut, die Dienste der PROFIBUS-Anwendungsschicht auf TCP/IP und Ethernet abzubilden.

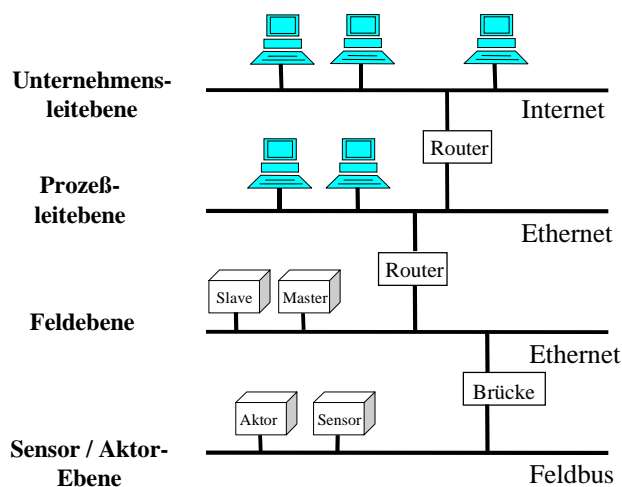


Abbildung 15: Internet Protokollwelt in den Ebenen der Unternehmenskommunikation

Brücken zwischen Ethernet und dem jeweils in der Sensor- / Aktorebene verwendeten Feldbus verbinden beide Ebenen.

B) Ethernet/ PROFIBUS Brücke

Die in Abbildung 16 dargestellte Architektur einer PROFIBUS / Ethernet-Brücke ermöglicht den Übergang von PROFIBUS auf Ethernet. Durch eine Adreßumsetzung von PROFIBUS-Adressen auf MAC-Adressen erlauben die Brücken den Zugriff auf PROFIBUS-Geräte von außerhalb des PROFIBUS [Soft99].

Mittels Transport des unveränderten PROFIBUS-Telegramms, eingekapselt in einen Ethernet-Rahmen, können PROFIBUS-Segmente transparent verbunden werden. Ohne Hinzunahme einer Netzwerkschicht wird die Kopplung jedoch auf die Ethernet-Broadcast-Domain beschränkt bleiben und bietet wegen der geringen Ausdehnung daher nur wenig Potential. Hauptsächlichste Verwendung findet eine derartige Brücke bei der Verbindung der Feldebene mit der Leitebene. Entsprechende Produkte [Soft99] sind bereits im Einsatz. Aus der Leitebene heraus wird es möglich, Fernüberwachungs-, Fernbedienungsfunktionen und den Zugriff auf Betriebsdaten zu vollführen. Die Verbindung von Feldbusinseln auf diesem Wege wird nicht als Anwendung der PROFIBUS-Ethernet-Brücken gesehen.

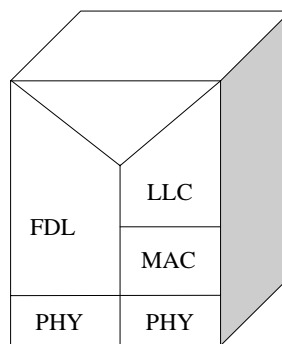


Abbildung 16: PROFIBUS-Ethernet-Brücke

C) Ersatz der Schicht 2 des PROFIBUS durch Ethernet und TCP/IP

Eine vollständige Integration von Ethernet in die PROFIBUS-Geräte wird durch Austausch der kommunikationsorientierten Schichten des PROFIBUS durch Ethernet Schichten 1 und 2 entsprechend Abbildung 17 möglich. Die PROFIBUS-Nutzerorganisation [PNO99] hat 1998 eine Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die sich mit der Abbildung der PROFIBUS-Dienste auf TCP/IP und Ethernet befaßt.

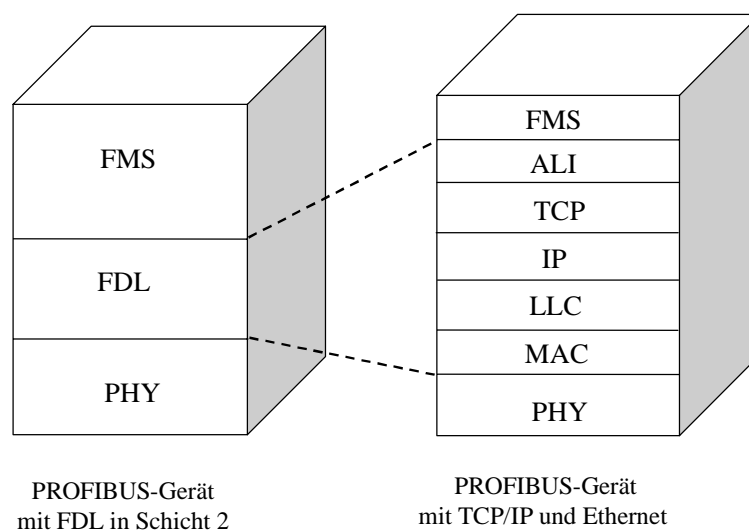


Abbildung 17: PROFIBUS-Anwendungsschicht über TCP/IP und Ethernet

In [Furr98] wird umfassend auf die positiven und negativen Aspekte der Nutzung von Ethernet in Verbindung mit TCP/IP auf die Erfüllung von Echtzeitanforderungen eingegangen. Insbesondere wird dort auch das nichtdeterministische Zugriffsverfahren CSMA/CD von Ethernet als hinderlich eingestuft, aber gleichzeitig ein Vorschlag gemacht, diesen Nachteil zu kompensieren. Furrer propagiert ein „predictable Ethernet“, das oberhalb der Schicht 2 spezielle Betriebsvorschriften zur Minimierung der Kollisionen auf dem darunterliegenden Ethernet definiert. Es wird vorgeschlagen, die Last auf dem Ethernet durch Beschränkung der Nachrichten jeder einzelnen Station einzugrenzen.

Als Maßnahmen zur Lastbeschränkung werden Grenzwerte für die maximale mittlere Nachrichtenrate, maximale mittlere Länge einer Nachricht und ein minimaler Abstand zwischen der Erzeugung von Nachrichten vorgeschlagen. Eine in Abbildung 17 angegebene Zwischenschicht (ALI – Application Layer Interface) unterhalb der Anwendungsschicht (PROFIBUS FMS) hat diese Aufgaben zu erfüllen.

Laut Furrer wird das Ethernet-Verhalten durch die Lastbeschränkungen signifikant verbessert und Ethernet wird für den Einsatz als Feldbus tauglich. Obgleich Ethernet dadurch nicht deterministisch wird, kann sein Verhalten als voraussagbar angesehen werden.

Ethernet allein wird der Anwendung keine gesicherte Übertragung der Rahmen bieten. Die gewohnten Nachrichtenzyklen mit Quittungsfunktionen zum Nachweis erfolgreicher Übertragung müssen durch äquivalente Mechanismen ersetzt werden. Die TCP/IP-Protokolle ergänzen Ethernet um die gewünschte Funktionalität, bringen aber gleichzeitig weiteren Overhead durch Protokollköpfe (minimal 40 Bytes) mit sich. Zusätzlich entstehen Verzögerungen durch die Verarbeitung der Protokollinformationen. Diese beziffert Furrer mit einigen Millisekunden und zeigt mittels Simulationen, daß mittlere Nachrichtenverzögerungen im Bereich von 10 bis 40 Millisekunden auftreten. In Extremfällen können diese bis zu 400 ms betragen.

Die Verwendung von IP ermöglicht den Einsatz von Routern und damit die Überwindung der Beschränkung auf eine Ethernet Broadcast Domain. Probleme beim Zusammenwachsen der Internet Protokollwelt und der Feldbusse bereitet jedoch neben dem kollisionsbehafteten Medienzugriffsverfahren des Ethernet vor allem die mangelnde Dienstgüteunterstützung durch den TCP/IP Protokollstapel. Bisher konnte sich für die Unterstützung von Dienstgüten noch keine Technik etablieren. Mehrere vielversprechende Ansätze befinden sich aber derzeit in der Diskussion, auf die im folgenden Bezug genommen wird.

Ein Konzept, das zwar keine Dienstgütegarantien geben kann, aber dennoch zum Ziel hat, Überlastsituationen einzugrenzen, setzt auf die Fähigkeiten von Anwendungen, sich an wechselnde Lastsituationen anzupassen. Mittels Beobachtung des aktuellen Netzzustandes und der Aufforderung an Anwendungen, beispielsweise die Senderate zu verändern, wird reaktiv auf Stausituationen eingegangen. Eine präventive Vorgehensweise wird hierbei nicht unterstützt. Das Real-Time Protocol (RTP) [RFC1889] kann z.B. für eine Rückkopplung zwischen Sender und Empfänger eingesetzt werden, mittels derer die aktuell festgestellten Dienstgüten, wie z.B. Durchsatz, Verzögerung oder Verlustraten vom Empfänger zum Sender übermittelt werden. Vom Sender kann daraufhin der Datenstrom entsprechend angepaßt werden. Zur Anwendung auf Feldbusapplikationen eignet sich diese Methodik jedoch nicht.

Für die Reservierung von Ressourcen im Internet sind die Integrated Services [RFC1633, RFC2215] geeignet. Mittels Signalisierungsprotokollen werden die Ressourcen in Endsyste-

men und Routern reserviert. Die Ressourcen werden dann genau den Anwendungen zur Verfügung gestellt, welche die Reservierung vornahmen.

Das Resource Reservation Protocol (RSVP) [RFC2205, RFC2379] stellt entsprechende Funktionen zum Austausch von Reservierungsinformationen für Ressourcen in Routern zur Verfügung auf deren Basis die Priorisierung von Datenströmen in den Routern erfolgt.

Differentiated Services [RFC2475] wird ein Konzept genannt, das Dienstgütern zwar nicht für einzelne Anwendungen garantieren kann, sich aber für die Unterstützung von Dienstqualitäten bei der Verbindung von Netzen eignet. Das Konzept basiert auf der Aggregation und Reservierung für eine Menge von Anwendungsdatenflüssen. IP-Pakete werden bereits im Endsystem oder in Routern mit unterschiedlichen Prioritäten versehen. Innerhalb der Router werden den Prioritätsklassen Ressourcen, hauptsächlich Bandbreiten, zugewiesen. Premium Service und Assured Service sind zwei Ansätze hierzu. Von Routern empfangene Pakete werden klassifiziert und in jeweils separate Warteschlangen für jeden Dienst (Premium, Assured, Best-Effort) eingestellt, die mittels eines Schedulers bedient werden. Der Scheduler behandelt Pakete des Premium-Service bevorzugt vor solchen des Assured Service und diese priorisiert gegenüber den Best-Effort-Paketen. Die Eintreffrate der Pakete bestimmt die Auslastung bzw. provoziert die Überlastung einzelner Router, so daß auf Shaping-Funktionen zurückgegriffen werden muß, um die Überlast-Situationen einzudämmen. Das Ziel ist es, nicht mehr als die zugelassene Rate von Paketen einer Dienstklasse weiterzuleiten. Dies ruft wiederum Verzögerungen oder Paketverluste hervor.

Fast bzw. Gigabit Ethernet

Beide Ethernetvarianten zeichnen sich durch vielfach höhere Datenraten als das klassische Ethernet aus, die zudem weit oberhalb derer von PROFIBUS liegen. Dies legt den Schluß nahe, daß lastbegrenzende Maßnahmen trotz der kollisionsbehafteten Zugriffsverfahren nicht notwendig sind und darauf vertraut werden kann, daß die zur Verfügung stehende Kapazität ausreichend ist, so daß Kollisionen nicht ins Gewicht fallen. Dennoch, die kollisionsbehafteten Medienzugriffsverfahren von Fast- und Gigabit Ethernet [John96] stellen einen Nachteil dar, der diesen beiden leistungsgesteigerten Ethernetvarianten trotzdem nicht die Eigenschaften verleiht, Datenverkehr in vorhersagbaren Abständen und Zeiträumen abzuwickeln. Prinzipiell lassen beide bei schwacher Auslastung echtzeitnahen Datenverkehr zu. In Situationen sehr vieler, dicht aufeinanderfolgender Sendeanforderungen arten diese jedoch zu Systemen aus, die auch eine näherungsweise Voraussage der für den PROFIBUS-Datenaustausch wichtigen Verzögerung wegen des Zugriffsverfahrens nicht mehr zulassen. Die Nachteile des Zugriffsverfahrens kommen auch hier zum tragen was wiederum der geforderten Abwicklung von Nachrichtenzyklen mit harten Zeitanforderungen keinesfalls zuträglich ist. Die in [Furr98] getroffenen Aussagen lassen sich daher prinzipiell auch auf die leistungsgesteigerten Ethernetvarianten anwenden.

Ihre Leistungsvorteile können Fast- und Gigabit-Ethernet ausspielen und Kollisionen werden zu einem zu vernachlässigenden Faktor, wenn jede Station direkt an einen Switch-Port angeschlossen wird. Dies erzwingt aber, von der Linientopologie auf die sternförmige Verkabelung zu wechseln. Jedoch gerade die linienförmige Verkabelung ist die üblicherweise bei den Feldbussen bevorzugte Variante, um in verteilten Umgebungen Stationen an das Kommunikationssystem anzuschließen. Ein Wechsel zu sternförmiger Verkabelung zieht bei Systemen mit vielen Teilnehmern einen sehr hohen Aufwand nach sich und schränkt zugleich die Flexibilität ein.

Um darüber hinaus Strecken mit mehreren Kilometern Länge über Fast/Gigabit-Ethernet überbrücken zu können, müssen angeschlossene Teilnetze über Router gekoppelt werden.

Router stellen in diesem Zusammenhang zwar wegen ebenfalls implementierbarer Möglichkeiten, der Reservierung (Integrated Services) und der Priorisierung (Differentiated Services) von Datenströmen weniger einen Engpaß dar. Aber auch Router unterliegen schwankenden Lasten und besonders die hier im Gegensatz zu ATM vorkommenden Pakete unterschiedlicher Länge erschweren die Aufrechterhaltung von Dienstqualitäten.

Bei der Betrachtung der Relation von Paketgrößen zu Overhead spielen beide PROFIBUS und Ethernet ihre Vorteile verschieden aus. Legt man zugrunde, daß bei PROFIBUS weitaus überwiegend kurze Telegramme mit einer Länge von unter 30 Bytes übertragen werden, so sind 53 Bytes lange Zellen mit einem Nutzdatenanteil von 48 Byte bzw. Netto-Datenanteil von 44 Bytes bei AAL 5 in diesen Fällen gut als Übertragungscontainer geeignet. Nachteilig wirkt sich die feste Zellengröße nur bei sehr kurzen Telegrammen wegen des Overheads aus. Gleichfalls als nachteilig ist die erforderliche Segmentierung langer Telegramme und der damit verbundenen Zellen-Kopf-Overhead anzusehen. Im Falle von Ethernet müßten hier lange PROFIBUS-Telegramme nicht segmentiert werden. Nachteilig wirkt sich aber der bei Ethernet in Verbindung mit TCP/IP auftretende höher Protokollaufwand aus.

2.6 VLANs

Zum Gegenstand dieser Arbeit lassen sich einige Parallelen zu dem Konzept der VLANs ziehen, die im folgenden diskutiert werden. Insbesondere weil hierbei ATM derzeit als die favorisierte Technik angesehen wird und weil sich einige Funktionen von Netzkoppelementen darin wiederfinden, rückt dieses Konzept ins Blickfeld der Betrachtung [Brau99, Ditt97]. Gemäß IEEE 802.1q sind VLANs eingebettet in eine Infrastruktur, die durch Brücken bzw. Switches gekennzeichnet ist. VLANs sind damit Netze ohne Hierarchien. Die einzelnen Netzsegmente werden mit Switches verbunden, die Datenpakete transportieren, ausfiltern oder fluten. Während traditionelle Brücken beim Fluten ein Datenpaket an alle Ausgänge senden, geben VLAN-Switches Broadcasts nur an die Ausgänge weiter, die zum selben virtuellen Netz gehören.

VLANs erlauben, daß man beliebige Netzteilnehmer aus verschiedenen Netzsegmenten nach bestimmten Kriterien zu einem logischen Netz vereinen kann, ohne daß hierzu das Netzwerk physikalisch umstrukturiert werden muß. Damit entspricht ein virtuelles Netz einer Broadcast Domain, wie sie von der klassischen Ethernet-Technik her bekannt ist.

Wenn es in einem LAN zu Kapazitätsengpässen kommt, beginnt man üblicherweise, das vorhandene LAN zu segmentieren. Je weniger Rechner sich ein LAN-Segment teilen müssen, desto größer wird die verfügbare Bandbreite für den Einzelnen. Im Extremfall führt dies zur Mikrosegmentierung, bei der jeder Rechner ein eigenes LAN-Segment erhält.

Mit VLANs läßt sich das Problem viel leichter in den Griff bekommen. Die Aufteilung des physikalischen Netzes in logische Einheiten sorgt für eine Art "load sharing". Broadcasts und Multicasts werden nicht über das ganze Netz geflutet, sondern nur in die Subnetze transportiert, die zum gleichen VLAN gehören. Die Zugehörigkeit von MAC-Frames wird durch Tagging signalisiert. Die Tags werden durch die Switches erzeugt und wieder entfernt.

Als Infrastruktur für solche VLANs wird aktuell ATM wegen seiner vom ATM-Forum eingeführten „LANE 2.0“ für den Aufbau von virtuellen LANs favorisiert.

Der Standard 802.1p beschreibt Verfahren, MAC-Rahmen unterschiedliche Prioritäten zuzuordnen und die Reaktion der Zwischenelemente darauf. Die Mechanismen können für die Priorisierung von Telegrammen aus unterschiedlichen Segmenten bei der Kopplung unabhängig operierender PROFIBUS-Segmente adaptiert werden.

Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden Ansätze und Mechanismen außerhalb von ATM vorgestellt, deren Verwendung im Zusammenhang mit der in dieser Arbeit behandelten Thematik gegenwärtig diskutiert wird. An mehreren Stellen wurden bereits Vergleiche zu der in dieser Arbeit gegenständlichen Konzeption zur Kopplung von PROFIBUS-Segmenten mittels ATM angestellt. Diese sollen hier zusammengefaßt werden.

Mit Ethernet und TCP/IP dringt die Protokollwelt der lokalen Netzwerke und des Internet in die Industrieautomation vor. Ohne geeignete Anpassungen bleibt das Zugriffsverfahren von Ethernet jedoch der limitierende Faktor. Durch die Einführung von lastbegrenzenden Maßnahmen bei jeder beteiligten Station kann Ethernet ein in Grenzen voraussagbares Antwortverhalten liefern. Zusätzlich muß bei Verwendung von Ethernet jeder Datenverkehr, der nicht ausdrücklich an die Stationen der Ethernet-Segmente im Echtzeitbereich gerichtet ist, ferngehalten werden. Die Kopplung zu übergeordneten Netzwerken darf daher nur durch Brücken und wenn die höheren Schichten zur Betrachtung herangezogen werden, durch Router geschehen. Zugleich ist damit die Lastbeschränkung für die Stationen verbunden, die von außerhalb der Echtzeit-Segmente mit Stationen im Echtzeitbereich kommunizieren. Dies bedeutet für die Stationen des übergeordneten Netzes, sich den Lastbeschränkungen zu unterwerfen, um den Kommunikationsablauf innerhalb des Echtzeitbereiches nicht zu beeinträchtigen. Die Kommunikation mit Teilnehmern im Echtzeitbereich bleibt daher nur Stationen vorbehalten, die über Möglichkeiten der Lastbegrenzung durch die Anwendung verfügen. Sind Router auf dem Kommunikationsweg involviert, fallen zusätzlich deren mangelnde Fähigkeiten zur Dienstgüteunterstützung, zu deren Beseitigung derzeit Ansätze noch in der Diskussion sind [Brau99], ins Gewicht. Die Kommunikation eignet sich dann nur noch für zeitunkritische Vorgänge.

Dem gegenüber steht mit ATM eine Technologie zur Verfügung, die verschiedene Qualitätsklassen bereitstellt und differenzierte Anforderungen an die Dienstqualität erfüllen kann und auch Anwendungen mit Echtzeitanprüchen genügt. Die schnelle Übermittlung von kleinen Zellen und der im Verhältnis zur Kombination Ethernet und TCP/IP geringere Overhead sprechen für den Einsatz von ATM zur Verbindung von PROFIBUS-Segmenten.

Bei ATM ist eine differenziertere Wahl von Dienstqualitäten möglich, die eine Adaption an eine breitere Palette von Anwendungsanforderungen gestattet. Die bei ATM praktizierte eindeutige Zuweisung von Netzwerkressourcen in Verbindung mit Überwachungsfunktionen und festen Paketgrößen sichert die Priorisierung für die unterschiedlichen Datenströme. Dedizierte QoS ist somit ein eindeutiges Differenzierungsmerkmal zwischen ATM und Fast/Gigabit-Ethernet sowie den vorgestellten Konzepten zur Realisierung von Dienstgütern im Internet.

3 Konzepte zur Kopplung von PROFIBUSsen

3.1 Vorausbetrachtungen für den Entwurf der Kopplungsmodelle

In diesem Teilabschnitt werden die für die allgemeine Zielsetzung der Arbeit relevanten Teilaufgaben anhand von Entwurfszielen präzisiert.

Im Mittelpunkt der Anforderungen steht der möglichst fehlerfreie und verzögerungsarme Transport von PROFIBUS-Telegrammen durch ein ATM-Netz. Dem Entwurf geht die Analyse voran, auf welchen Schichten eine Verbindung von PROFIBUS mit ATM als sinnvoll erachtet werden kann. Im Anschluß daran müssen Verbindungselemente zwischen PROFIBUS und ATM entworfen und deren Funktionalität abgesteckt werden. Es besteht der Anspruch, auch in einem durch ATM gekoppelten System harte Zeitanforderungen bei der Kommunikation zwischen PROFIBUS-Anwendungen zu befriedigen. Dazu sind die Anforderungen, die PROFIBUS an die Qualität eines Übertragungsdienstes stellt, zu untersuchen bzw. das Kommunikationsverhalten in einem PROFIBUS-System zu studieren. Auf der Basis der Analyse sind die Qualitätsanforderungen auf die von ATM-Verbindungen bereitstellbaren QoS abzubilden. Dies schließt sowohl die Wahl der geeigneten Dienstklasse, des ATM Adaption Layers als auch die durch Funktionen unterstützte explizite Wahl von Qualitätsparametern ein. Es muß davon ausgegangen werden, daß die Kopplung mittels ATM nachhaltige Einflüsse auf die Parametrierung von PROFIBUS-Systemen hat. Diese Einflüsse werden untersucht. Andererseits können vermutlich durch geschickten Entwurf einer geplanten PROFIBUS-Anlage die Auswirkungen der durch ATM bedingten Verzögerung auf ein Minimum zurückgedrängt werden. Regeln für einen diesbezüglich optimalen Entwurf einer Anlage werden aufgestellt. Auf der Seite von ATM sind die zu den Verzögerungen führenden systembedingten Eigenschaften von Relevanz. Weiter ist die Rolle des aktuellen Zustands eines Vermittlungssystems für dessen Beitrag zur Verzögerung von Zellen von Interesse. Andererseits ist aus der Sicht von ATM mit dessen Ressourcen schonend umzugehen. Dazu bewegt sich der Anspruch der Kopplung im Spannungsfeld zwischen der Erbringung bester Leistungen beim Transport von PROFIBUS-Telegrammen und der effizienten Ausnutzung der ATM-Ressourcen, um diese auch anderen Anwendungen der Unternehmenskommunikation zugänglich zu machen.

- **Ausnutzung spezifischer Eigenschaften von ATM**
Es sollen beim Entwurf der Funktionen der Koppellemente möglichst die im Sinne der Aufgabenstellung vorteilhaften Eigenschaften von ATM Verwendung finden. Dazu sind diese entsprechend zu analysieren und mit den Anforderungen abzugleichen.
- **Anpassung an charakteristische Fehlertypen von ATM**
Aber auch die typischen im Abschnitt 2.4.6 diskutierten, Schwachstellen von ATM müssen mittels geeigneter Mechanismen kompensiert werden. Das sind besonders die durch Pufferüberlauf auftretenden korrelierten Zellverluste. Dieses Charakteristikum für ATM

sollte beim Entwurf der Fehlerkontrolle berücksichtigt und Fehlerkontrollmechanismen daran angepaßt werden.

- **Anpaßbarkeit an einen weiten Bereich von PROFIBUS-Anwendungen**
Die weite Palette der automatisierungstechnischen Anwendungen, für die PROFIBUS geeignet ist, soll möglichst auch durch ein mittels ATM gekoppeltes System unterstützt werden. Bedenken hinsichtlich dieser Forderung kommen auf, wenn die zusätzlichen Verzögerungen, die der Transfer durch ATM mit sich bringt, betrachtet werden. Es gilt herauszufinden, in welchen Grenzen die Verzögerungen grundsätzlich einzukalkulieren sind und abzuschätzen, welche Anwendungen dadurch zukünftig nicht mehr realisierbar sein können.
- **Skalierbarkeit**
PROFIBUS Systeme verwenden einen Bereich von Datenraten, der von 9,6 Kbit/s bis zu 12 Mbit/s reicht. Das Kopplungsprinzip sollte der Verwendung aller standardisierten Datenraten keine Grenzen auferlegen. Daneben sind die Limitierungen auf die Anzahl zu verbindender Segmente bzw. die Gesamtzahl der Teilnehmer zu betrachten. PROFIBUS stellt hierbei einerseits eigene Beschränkungen (Anzahl der Teilnehmer pro Segment) auf. Andererseits können Wege gefunden werden, diese Beschränkungen teilweise aufzuheben.

3.2 Möglichkeiten der Kopplung

Der Vorstellung der Kopplungsansätze wird mit diesem Kapitel die Diskussion der grundsätzlichen Kopplungsmöglichkeiten, bedingt durch die Architektur von PROFIBUS, vorangestellt. Abbildung 18 gibt eine Übersicht über die möglichen Ausprägungen der Kopplung von PROFIBUSsen über ATM. Im folgenden werden die einzelnen Varianten diskutiert und jene herausgestellt, die Gegenstand weiterer Untersuchungen sind.

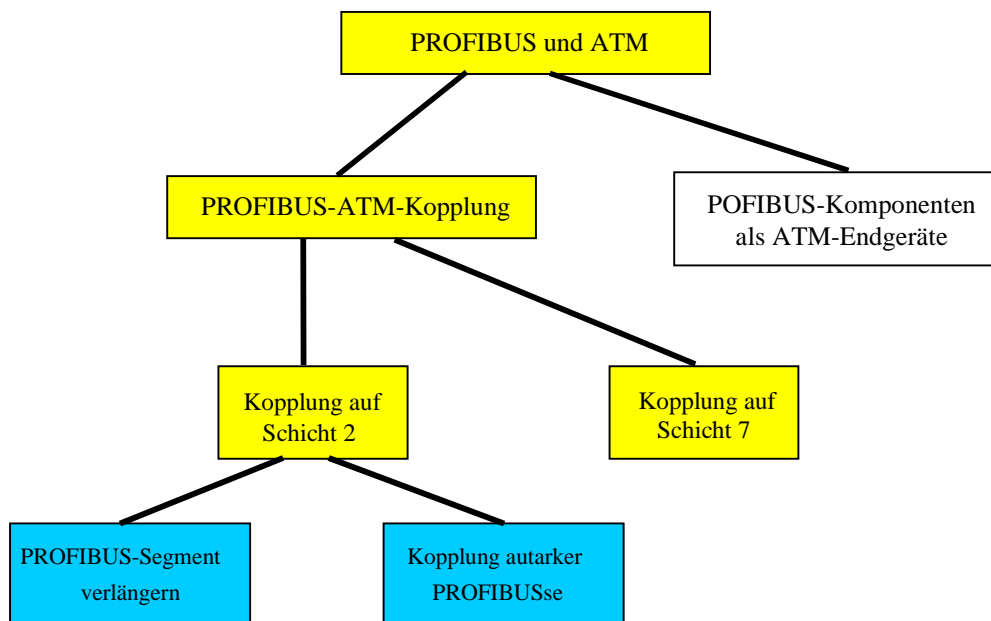


Abbildung 18: Möglichkeiten der Kopplung von Feldbussen und ATM

Kopplung auf Schicht 1

Die Kopplung auf der physikalischen Ebene entspricht dem Kopieren und Verstärken von Signalen zwischen zwei Kabelabschnitten. Im PROFIBUS-Standard ist dies bereits verankert, um dadurch die Ausdehnung von PROFIBUS-Segmenten zu erhöhen. Die Firma Siemens bietet beispielsweise Umsetzer (OLM) [Siem] von elektrischen auf optische Signale und umgekehrt an. Beim Übergang zwischen den Kabelabschnitten wird aber jeweils nur bitweise operiert, nicht das gesamte Telegramm betrachtet. Dadurch besteht keine Möglichkeit, Telegramminhalte auszuwerten und entsprechende Reaktionen einzuleiten. Die Kopplung in der Schicht 1 mit ATM ist nicht möglich und wird deshalb nicht weiter diskutiert.

Kopplung auf Schicht 2

Vorrangig zur Diskussion stehen in dieser Arbeit die Varianten, die eine Kopplung auf Schicht 2 vorsehen. Ziel der Arbeit ist es, PROFIBUS-Segmente unter Beibehaltung des Medienzugriffsverfahrens für die PROFIBUS-Komponenten möglichst transparent zu verbinden. Eine Randbedingung, aber keine grundsätzlich bindende, ist die Wahrung des Investitionsschutzes, d.h. existierende PROFIBUS-Komponenten möglichst ohne Veränderung auch in über ATM verbundenen PROFIBUSSen einsetzen zu können. Grundcharakteristik dieser Ansätze ist das Übertragen von PROFIBUS-Telegrammen im Nutzdatenteil von ATM-Zellen und die damit für den PROFIBUS transparente Übertragung durch das ATM-Netz. Dazu werden die Telegramme als AAL-Dienstdateneinheiten der Adaptionsschicht übergeben.

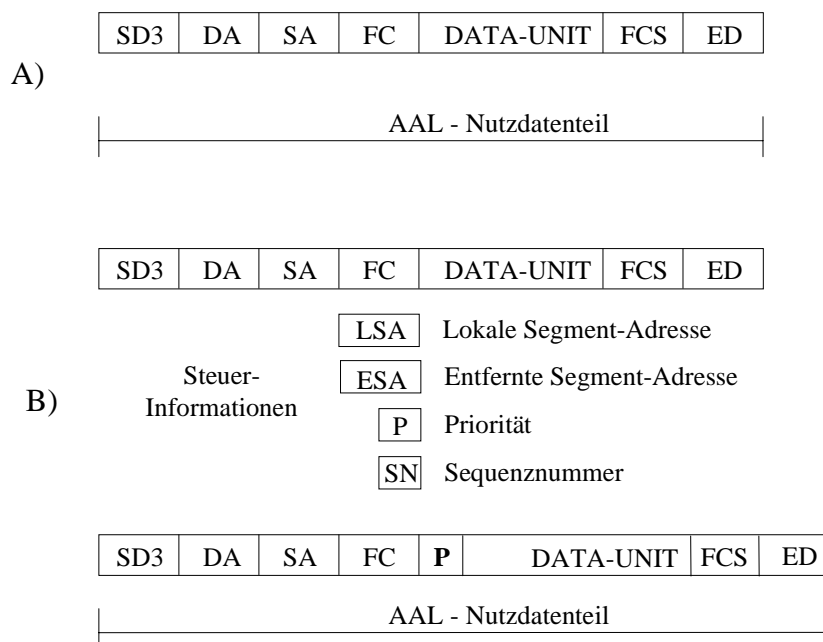


Abbildung 19: PROFIBUS Telegramm als AAL-Nutzdaten

Die Abbildung 19 zeigt zwei verschiedene Vorgehensweisen bei der Behandlung der PROFIBUS-Telegramme. Einerseits können die Telegramme ohne Veränderung der AAL-Schicht übergeben werden A), was einer Einkapselung gleichkommt. Andererseits können die Telegramme einer Transformation, z.B. einer Adreßumwandlung in Verbindung mit dem Hinzufügen von Steuerinformationen, unterzogen werden. Zusätzliche Informationen zur Steuerung können Prioritätsmarkierungen, Segmentadressen oder Sequenznummern sein. In

beiden Fällen bleiben die Nutzdaten der PROFIBUS-Telegramme jedoch unverändert. In Abbildung 19 B) beispielsweise wird das PROFIBUS-Telegramm durch das Koppel-element entsprechend einer vorher festgelegten Funktion einer Prioritätsklasse zugeordnet. Diese Prioritätsklasse wird in dem zum entfernten Segment gehörenden Koppel-element ausgewertet, dem PROFIBUS aber nicht übergeben.

Kopplung auf Schicht 7

Unter Zuhilfenahme einer Umsetzung der Funktionalität der Anwendungsschicht ist gleichfalls die Kopplung bzw. ein Protokollübergang in der Schicht 7 denkbar. Die Verwendung von ATM wird auch hierbei in der Funktion als Transportmedium liegen. Die signifikante PROFIBUS-Charakteristik geht bei einer solchen Kopplung jedoch verloren. Dies liegt im Protokollübergang und des damit verbundenen Verlustes der Transparenz begründet. Eine solche Verbindungsvariante soll hier nur als prinzipiell möglich erwähnt werden. Sie besitzt nur geringe Bedeutung in Bezug auf die zu bearbeitende Aufgabenstellung, die mit der abschließlichen Kopplung von PROFIBUS-Segmenten befaßt ist.

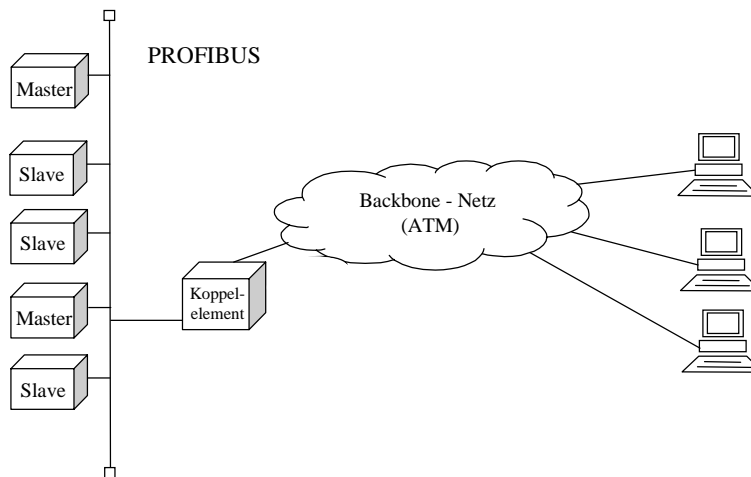


Abbildung 20: Variante der Kopplung auf Schicht 7

In Abbildung 20 ist schematisch eine Netzarchitektur dargestellt, die bei einer Protokollumsetzung in der Anwendungsschicht denkbar ist. Auf der linken Seite der Abbildung wird der PROFIBUS mit einer Anzahl Mastern und Slaves wiedergegeben. Ein Koppel-element ist an den PROFIBUS angeschlossen, welches gleichzeitig eine Verbindung zum ATM-Netz besitzt und die Protokollumsetzung vornimmt. Entfernt liegende Endgeräte im rechten Teil der Abbildung, die dasselbe Protokoll verstehen, in die das Gateway die PROFIBUS-Telegramme umgesetzt hat, erlangen auf diese Weise Zugriff auf den PROFIBUS. Ein Beispiel für eine derartige Protokollumsetzung kann ein Dateiübertragungsprotokoll, das beispielsweise auf einer TCP-Verbindung abläuft, sein. Die Endgeräte im rechten Teil der Abbildung, welche die TCP/IP Protokolle beherrschen, können in Verbindung mit Classical IP over ATM [RFC1577, RFC1932] oder LAN-Emulation over ATM [LANE95, LANE97] mit den PROFIBUS-Geräten in Kontakt treten, wenn das Koppel-element für die Umsetzung der transferierten Dateneinheiten auf PROFIBUS-Telegramme und umgekehrt sorgt.

PROFIBUS-Komponenten als ATM-Endgeräte

Keine Kopplung im engeren Sinne, aber grundsätzlich in den Rahmen der Zielstellung fällt ein sich von der klassischen Sichtweise der Feldbus-Kommunikation abwendender Ansatz, der direkte Gebrauch von Feldgeräten als ATM-Endgerät. Das Augenmerk soll an dieser Stelle kurz darauf gelenkt werden. Abbildung 21 zeigt direkt an ein ATM-Netz angeschlossene Feldbusgeräte. Prinzipiell können anstelle des ATM-Netzes auch andere Netze zur Verbindung der Feldbus-Komponenten eingesetzt werden. Die positiven Eigenschaften, die ATM für eine derartige Verwendung vorteilhaft erscheinen lassen, werden im folgenden diskutiert.

Bei der direkten Anschaltung von PROFIBUS-Geräten an ein ATM-Netz treten einige begrenzende, nachteilige Aspekte konventioneller Feldbussysteme komplett in den Hintergrund. Andere negative Aspekte wiederum treten in Erscheinung. Um ein ganzheitliches Bild der Kopplungsmöglichkeiten zu geben, sollen in diesem Abschnitt die Vorzüge und Nachteile einer solchen Kopplung diskutiert werden.

Ausgangspunkt ist die grundsätzliche Absicht, mit der Feldbusse entworfen wurden, die Realisierung einer effizienten Kommunikation zwischen verteilten Anwendungen im Umfeld von Automatisierungssystemen. Entsprechend dieser Zielstellung kann auf der Basis eines ATM-Transportsystems ein System entwickelt werden, welches den Anforderungen der Feldbuswelt, wie deterministische Reaktionszeiten oder Äquidistanz von Nachrichten, weitgehend gerecht wird. Die Idee, die sich dahinter verbirgt, ist ein Entwurf von Feldbuskomponenten, deren kommunikationsorientierte Schichten auf die direkte Anschaltung an ein ATM-Netz ausgelegt sind.

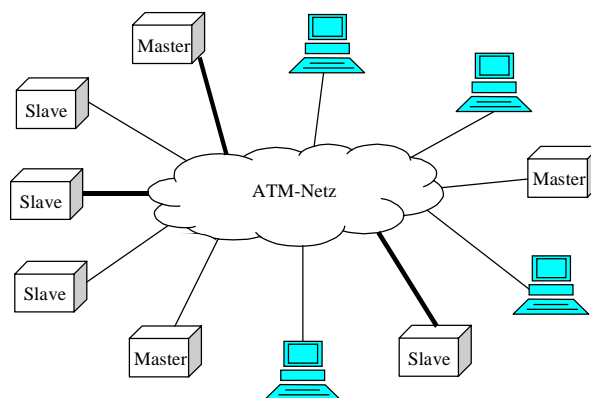


Abbildung 21: PROFIBUS-Komponenten als ATM-Endgeräte

Abbildung 21 zeigt eine mögliche Variante eines solchen Feldbusses. Zum Vergleich soll an dieser Stelle der Bezug zum PROFIBUS hergestellt werden. Die im Kontext von PROFIBUS verwendeten Begriffe zur Bezeichnung komplexer sowie einfacher Stationen finden sich in Abbildung 21 als Master und Slaves wieder.

Der offensichtlichste Unterschied zum klassischen PROFIBUS besteht in der Abkehr vom gemeinsam genutzten Übertragungsmedium hin zu dedizierten Leitungen für jedes angeschlossene Gerät. Entsprechend den Kommunikationsbeziehungen zwischen den einzelnen Geräten können virtuelle Verbindungen mit definierter Dienstqualität etabliert werden. Die Kommunikation zwischen den PROFIBUS-Geräten muß nicht mehr an Hierarchien oder de-

finierte Zugriffsverfahren gebunden sein, sondern unterliegt der spontanen Initiierung durch eine Station in Abhängigkeit von den Anwendungsprozessen. Das Warten auf die Zugriffsberechtigung entfällt.

Darüber hinaus wird die Nebenläufigkeit von Kommunikationsprozessen gefördert. Das als nachteilig identifizierte Stop-and-Wait-Prinzip des PROFIBUS bei der Abwicklung bestätigter Dienste kann überwunden werden. Im Hinblick auf die Skalierbarkeit in Bezug auf die Ausdehnung eines solchen Systems als auch die Anzahl anschließbarer Komponenten bringt ATM ebenfalls gute Voraussetzungen mit. Ein weiterer positiver Aspekt ist die Möglichkeit, ein eventuell bereits vorhandenes ATM-Netz soweit auszubauen, daß zusätzlich die Kommunikation der PROFIBUS-Geräte darüber abgewickelt werden kann. Damit ist die vertikale Integration der Feldebene in die Unternehmenskommunikation gewährleistet und von den in Abbildung 21 vorhandenen Arbeitsstationen kann auf PROFIBUS-Geräte zugegriffen werden.

In einem solchen Umfeld lassen sich bestimmte PROFIBUS-Geräte entsprechend dem VLAN-Konzept zu virtuellen Netzen zusammenfassen, dargestellt durch die unterschiedliche Strichstärke der Verbindungen zum ATM-Netz in Abbildung 21.

Einen kritischen Punkt kann in diesem Szenario der Durchsatz der ATM-Schalteinheiten bei hoher Netzbelastung darstellen. Es ist jedoch davon auszugehen, daß deren Leistungsfähigkeit keinen Engpaß bei der Vermittlung der Zellen bildet und damit nicht gegen die Erfüllung der von Feldbusanwendungen geforderten Dienstqualitäten spricht. Der durch die sternförmige Verkabelung entstehende hohe Aufwand darf nicht vernachlässigt werden und kann bei größeren Systemen nicht unerhebliche Kosten verursachen. Hohe Kosten verursacht auch die Anzahl der benötigten der Switch-Ports bei größeren Systemen. Ebenso wird die Anzahl virtueller Kanäle leicht unüberschaubar.

Auch diese Variante der Verbindung von Feldbus-Systemen mit ATM wird im Inhalt dieser Arbeit nicht weiter verfolgt. Die Absicht war es, das Augenmerk auch auf diese Kommunikationsmöglichkeit von Geräten im Automatisierungsumfeld zu lenken Vor- und Nachteile zu diskutieren und das Potential von ATM in dieser Hinsicht herauszustellen.

3.3 Zwischensysteme zur Kopplung

Ein geeignetes Netzelement zu finden und dessen Funktionsumfang abzugrenzen ist eine der ersten Aufgaben bei der Verfolgung der Zielstellung PROFIBUS-Systeme über ein ATM-Netz zu verbinden. In diesem Abschnitt werden die potentiell einsetzbaren Zwischensysteme zur Kopplung auf ihre Eignung für die Erfüllung der Verbindungsaufgabe betrachtet.

Repeater

Repeater (Signalverstärker) verbinden Teilnetze auf der physikalischen Ebene. PROFIBUS selbst sieht im Standard bereits die Verbindung von Segmenten mittels Repeatern vor, um in begrenztem Umfang den größtmöglichen Abstand zwischen zwei PROFIBUS-Teilnehmern zu erhöhen. Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits erläutert, daß die Kopplung von PROFIBUS und ATM den Ebenen 2 und 7 vorbehalten bleibt. Signalverstärker als Koppelemente sind daher von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen.

Brücke

Mit Blick darauf, daß eine Kopplungsvariante auf Schicht 2 verfolgt wird, gelangen Brücken [ZiSc95, Boro98] in den Mittelpunkt der Diskussion. Der grundlegende Aufbau einer solchen Brücke ist in Abbildung 22 dargestellt. Ausgehend von diesem Grundaufbau werden entsprechend den einzelnen beabsichtigten Funktionalitäten Ausprägungen der Brücken diskutiert.

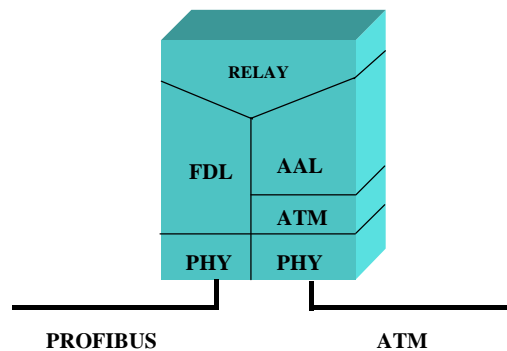


Abbildung 22: Schematischer Aufbau einer PROFIBUS-ATM Brücke

Router

Die hauptsächliche Aufgabe von Routern als Netzverbindungselemente in der Ebene 3 ist das zielgerichtete Weiterleiten von Dateneinheiten anhand der im Paket selbst transportierten Adresse. Die Kenntnis über die fehlende Ebene 3 der PROFIBUS-Architektur läßt dies bereits bei den ersten Überlegungen als Einschränkung erscheinen. Bewußt wurde beim PROFIBUS-Entwurf auf die Vermittlungsebene verzichtet, da die Verbindung einzelner PROFIBUS-Segmente als eher nachrangige Aufgabe angesehen wurde. Auf Funktionen, die von PROFIBUS in dieser Hinsicht bereits zur Verfügung gestellt werden, kann daher nicht zurückgegriffen werden. Aber auch das nachträgliche Hinzufügen solcher Funktionalität erweist sich in Anbetracht des folgenden Sachverhalts als nicht notwendig. Die Funktionsweise von Routern legt üblicherweise keine fest geschalteten Verbindungen zugrunde, sondern trifft Vermittlungsentscheidungen auf der Basis der aktuellen Situation in Verbindung mit definierten Parametern. Für die Kopplung von PROFIBUS mit ATM bringt ATM bereits den Mechanismus der virtuellen Kanäle mit, was für einzelne Zellen bedeutet, daß nach dem Verbindungsaufbau immer derselbe Weg beschritten wird. Darüber hinaus erlangt der Fakt Bedeutung, daß es sich bei ATM-Verbindungen auf der ATM-Ebene um Verbindungen mit einer Ende-zu-Ende Semantik handelt. Das führt zu der Feststellung, daß bei Nutzung von ATM Funktionen der Vermittlung, wie sie von Routern ausgeführt werden, bereits implizit vorhanden sind.

Abbildung 23 zeigt die Protokollarchitektur eines Koppellementes, das den Übergang in eine Umgebung, in der Classical IP over ATM oder LAN-Emulation verwendet wird, ermöglicht. Hier befindet sich oberhalb der AAL-Schicht eine IP-Instanz. Mit den Informationen, welche die IP-Schicht liefert, wird die Kommunikation über die Grenzen des ATM-Netzes möglich. Die Router, die an den Grenzen des ATM-Netzes angesiedelt sind, bestimmen dann anhand der IP-Adressen den weiteren Weg des Paketes.

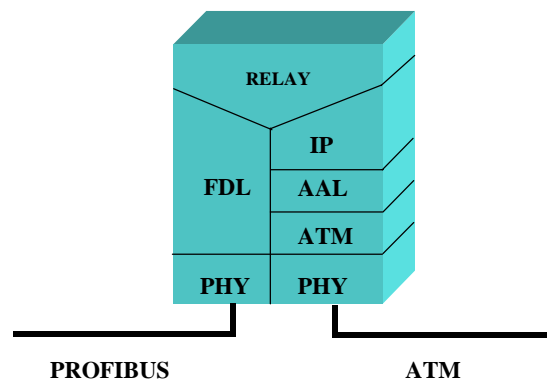


Abbildung 23: Koppellement zum Übergang auf IP

3.4 Allgemeine Kopplungsprinzipien

Gegenstand dieses Abschnittes sind die Vorstellung und die Diskussion der unter Einbeziehung der in Abschnitt 3.1 gestellten Ziele entworfenen Kopplungsansätze. Im weiteren wird einerseits der Ansatz vorgestellt, dem die transparente Verbindung mindestens zweier zu einem PROFIBUS-System gehörender Segmente zugrunde liegt. Ein zweiter Ansatz behandelt die Verbindung von unabhängigen PROFIBUSsen. Beim Entwurf der Kopplungsmodelle besteht primär die Absicht, die PROFIBUS Protokolle nicht zu verändern, d.h. die Zwischenschaltung eines ATM-Backbone für die PROFIBUS-Teilnehmer transparent zu gestalten. Mit der Kopplung verbundene Funktionalitäten sind weitestgehend in den Brücken zu implementieren.

Die Grundcharakteristik der Ansätze ist der Transport von PROFIBUS-Telegrammen in ATM-Zellen und die damit für die PROFIBUS Teilnehmer transparente Übertragung durch das ATM-Netz. Hierbei werden die Telegramme als AAL-Dienstdateneinheiten dem ATM-Protokoll-Stack übergeben. Mit Verweis auf die im Abschnitt 3.2 angestellten Betrachtungen und der Orientierung darauf, daß die Kopplung auf Schicht 2 erfolgt, wird im weiteren der Name Brücke als Bezeichnung für die Koppellemente verwendet. Der grundlegende Aufbau einer solchen Brücke ist im Abschnitt 3.3 bereits dargestellt worden. Ausgehend von diesem Grundaufbau wurden entsprechend den einzelnen beabsichtigten Funktionalitäten Ausprägungen der Brücken entworfen, die in späteren Abschnitten detailliert vorgestellt werden.

Zwischen den Brücken werden ATM-Verbindungen etabliert. Die Wahl kann dabei auf Punkt-zu-Punkt oder Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen fallen.

Da die PROFIBUS-Systeme typischerweise relativ statischer Natur sind, werden die Verbindungen einmalig während einer Initialisierungsphase etabliert und während des laufenden Betriebes nicht wieder abgebaut. Damit lassen sich Parallelen zu den Virtuellen Privaten Netzen (VPN) [Brau99] ziehen.

Ein zweiter Grund, der diese statische Verbindungsvariante verlangt, ist der relativ langsame Aufbau der ATM-Verbindungen. In der Praxis dauert ein Verbindungsaufbau mindestens einige Millisekunden. In Anbetracht der harten Zeitanforderungen ist daher vom bedarfsgerechten Auf- und Abbau von ATM-Verbindungen abzusehen.

Es genügt daher, z.B. PVCs zwischen den Brücken zu schalten. Nachteile dieses Vorgehens liegen jedoch in der geringen Flexibilität und dem wachsenden Administrationsaufwand bei steigender Anzahl von beteiligten PROFIBUS-Segmenten. PROFIBUS beherrscht das Hinzufügen und Entfernen von Teilnehmern im laufenden Betrieb. Für einzelne PROFIBUS-Geräte

in einem Segment stellt dies auch in den durch ATM gekoppelten Segmenten kein Problem dar. Die statischen Konfigurationen bedingen aber einen zusätzlichen Konfigurationsaufwand, wenn ganze Segmente zum Gesamtsystem hinzugefügt oder entfernt werden sollen.

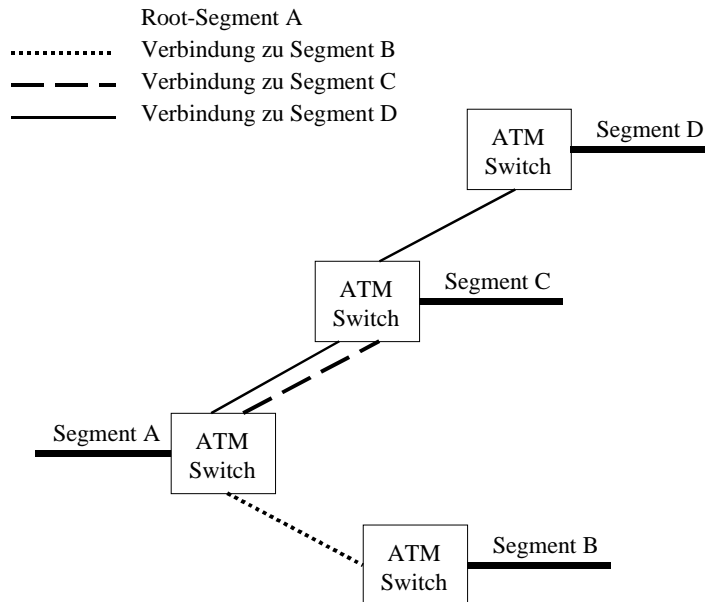


Abbildung 24: Punkt-zu-Punkt ATM-Verbindungen zwischen den PROFIBUS-Segmenten

Prinzipiell können die ATM-Verbindungen mit verschiedenen Dienstqualitäten aufgebaut werden. Entscheidend ist hierbei jedoch das Ziel der verzögerungsarmen und fehlerfreien Übertragung.

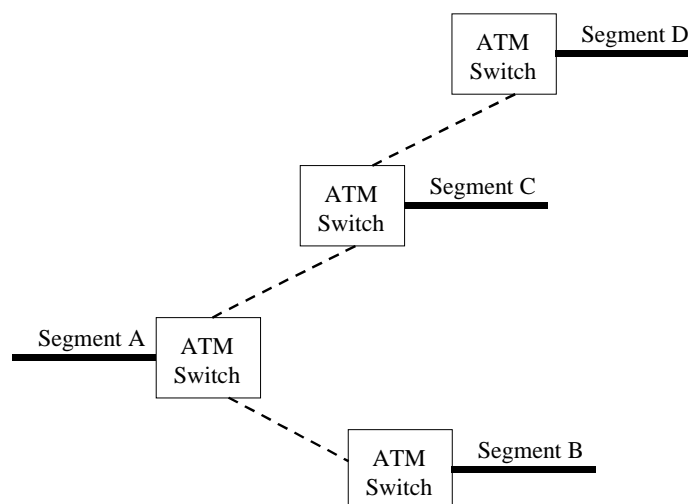


Abbildung 25: Punkt-zu-Mehrpunkt ATM-Verbindung zwischen den PROFIBUS-Segmenten

Um der Forderung nach Transparenz zu entsprechen, wird für die Fehlererkennung und –behebung primär davon ausgegangen, auf die inherenten Mechanismen des PROFIBUS zurückzugreifen.

Die Kopplung von PROFIBUS-Segmenten hat Auswirkungen auf den Entwurf während der Planungsphase einer Anlage und die Parametrierung der Systeme. Die Einflüsse der Kopplung auf das Verhalten des Gesamtsystems und besonders auf die Reaktionszeiten müssen bestimmt werden. Beispielhaft dafür ist in Abbildung 24 ein PROFIBUS-System mit unterschiedlich weit voneinander entfernten Segmenten dargestellt. Anhand von Abbildung 25 wird deutlich, daß bedingt durch die verschieden langen Wege und damit verschieden lange Übertragungszeiten wegen der Länge, aber vor allem wegen der möglicherweise verschieden starken Auslastung der involvierten Switches die Replikationen der PROFIBUS-Telegramme in den Segmenten nicht gleichzeitig ankommen können.

Besonders die unterschiedliche Anzahl Zwischensysteme, die zu durchlaufen sind, muß als maßgeblich in die Betrachtungen einbezogen werden. In gleicher Weise problematisch ist der Fall, in dem Szenario von Abbildung 24, bei dem ein aus Segment A ausgesendetes Telegramm die Segmente B, C und D erreichen soll, aber nur bei B und C eintrifft. Prinzipiell zu unterscheiden sind deshalb die Szenarien, bei denen zwei Segmente miteinander verbunden werden sollen und solche, bei denen mehr als zwei Segmente zu koppeln sind.

Hinsichtlich der Rolle des Tokens und dessen Transfer durch das Backbone-Netz können zwei Modelle unterschieden werden, auf die in der weiteren Arbeit Bezug genommen wird. Dies ist einerseits die Bildung eines PROFIBUS-Systems aus zwei oder mehreren Segmenten mit bei dem für alle Segmenten nur ein Token vorhanden ist. Demzufolge muß das Token über das Backbone-Netz übertragen werden. Die Mechanismen des PROFIBUS zur Tokenverwaltung bleiben erhalten.

Das zweite Modell geht davon aus, daß mindestens zwei voneinander unabhängig operierende PROFIBUSse gekoppelt werden. Im Unterschied zum ersten Modell wird hier in jedem Segment ein Token verwaltet. Kein Token wird über das ATM-Netz übertragen.

Beide Modelle sind im folgenden Gegenstand detaillierter Untersuchungen und werden vergleichend gegenübergestellt.

3.5 Modellansatz zur transparenten Verbindung von PROFIBUS-Segmenten

Prinzipiell kann das Koppeln von PROFIBUS und ATM als Verbindung von PROFIBUS-Segmenten bei diesem Ansatz im Sinne eines virtuellen LANs verstanden werden. Dem ATM-Netz kommt dabei in erster Linie die Aufgabe eines Backbone zu, welches transparent die PROFIBUS-Telegramme in eingekapselter Form (Abbildung 19) mit geringstmöglicher Verzögerung und bestenfalls verlustlos zu übertragen hat. An den Endpunkten des ATM-Netzes sind die Koppellemente angesiedelt. Abbildung 26 zeigt beispielhaft einen entsprechend dem Ansatz der transparenten Verbindung gekoppelten (virtuellen) PROFIBUS. Die Assoziation mit virtuellen LANs (VLAN, siehe Abschnitt 2.6) liegt hier nahe, da der gemeinsame Grundansatz vorhanden ist, bei dem eine Menge von Netzsegmenten eine Broadcast-Domain bilden und die Zusammenschaltung der zum virtuellen System gehörenden Teilnehmer unabhängig von ihrer Lokation möglich wird.

Im einfachsten Fall werden zwei PROFIBUS-Segmente verbunden. Grundsätzlich wird die Anzahl der zu verbindenden Segmente nicht durch das ATM-Netz begrenzt. Lediglich die bei

PROFIBUS vorhandene Beschränkung der maximalen Anzahl von Teilnehmern, bedingt durch den Adreßraum, ist maßgebend.

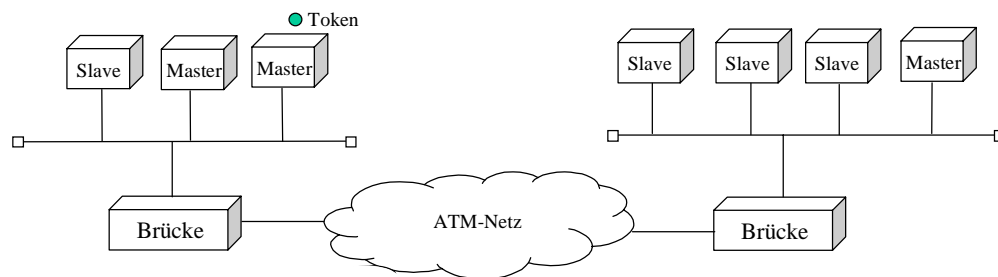


Abbildung 26: Beispiel eines virtuellen PROFIBUS mit zwei Segmenten

Entsprechend können beliebige Kombinationen erstellt werden mit mindestens je einem PROFIBUS-Gerät. Insbesondere sind auch Segmente mit ausschließlich passiven Teilnehmern möglich, wie in Abbildung 27 dargestellt.

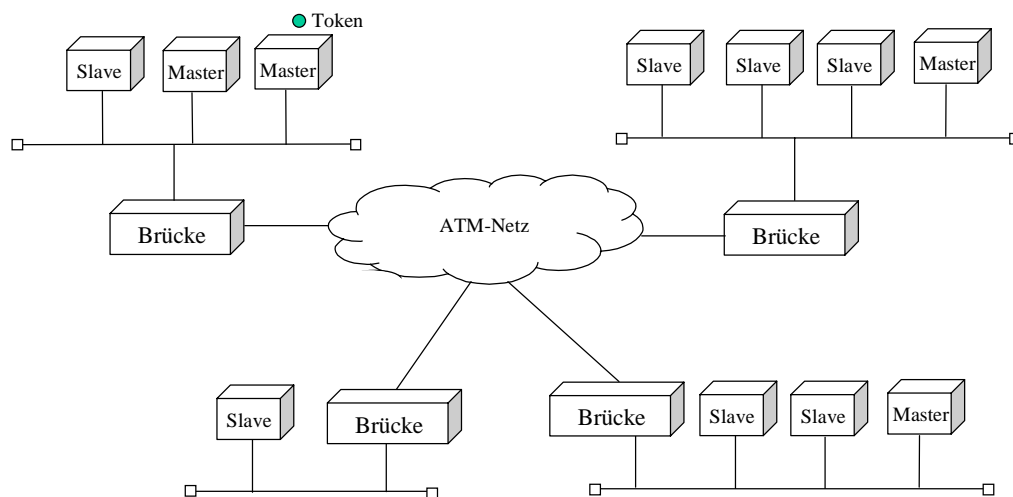


Abbildung 27: Beispiel eines virtuellen PROFIBUS mit vier Segmenten

3.6 Modellansatz zur Verbindung unabhängiger PROFIBUSse

Anders als beim ersten Ansatz zur Kopplung von PROFIBUS über ein ATM-Netz wird bei diesem Ansatz das Token nicht über das Backbone-Netz übertragen. Denn jedes eigenständige Segment verfügt selbst über ein Token, womit der Medienzugriff unter den Stationen des jeweiligen Segmentes geregelt wird. Andererseits ist hierbei jedoch zu beachten, daß neue Probleme durch die Eigenständigkeit der PROFIBUSse aufgeworfen werden. Das gravierendste der Probleme, insbesondere für die Erfüllung der harten Zeitanforderungen ist, daß die zu

einem PROFIBUS-Segment gehörende Brücke in dieser Kopplungsvariante am Token-Passing-Verfahren des PROFIBUS teilnehmen muß, dem sie angehört.

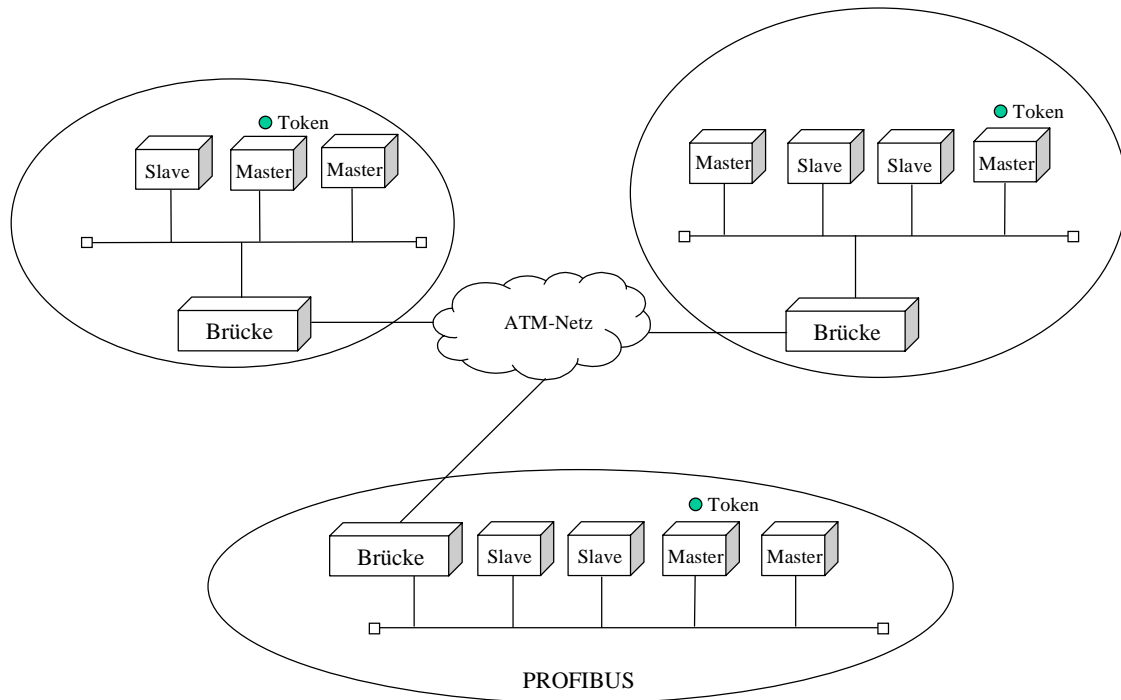


Abbildung 28: Verbindung unabhängig operierender PROFIBUSse

Für den Transport eines Telegramms von dem lokalen zu einem entfernten Segment ändert sich in diesem Falle nur wenig. Anders ist dies beim Empfang eines Request-Telegramms über das ATM-Netz. Hier kann die Brücke das Telegramm nicht sofort auf den PROFIBUS aussenden, sondern sie muß warten, bis ihr die Sendeberechtigung durch Tokenerhalt erteilt wurde. Im schlechtesten Falle, wenn die Brücke das Token gerade abgegeben hat, kann dies eine ganze Token-Umlaufzeit ausmachen. Trifft zu einem zuvor gesendeten Request die entsprechende Antwort ein, so darf die Brücke die Antwort sofort nach Erhalt auf den angeschlossenen PROFIBUS aussenden, da der Requester auf die Antwort wartet. Solange die Antwort noch nicht eingetroffen ist, gibt es wegen des Stop-and-Wait-Prinzips keinen Datenverkehr auf dem Segment.

Die Zusammenschaltung von unabhängig operierenden PROFIBUSsen erlaubt die Unterscheidung von Intra- und Intersegmentverkehr und bewirkt zugleich eine Lasttrennung bei optimaler Zusammenfassung intensiv miteinander kommunizierender Teilnehmer in dedizierten Segmenten. Darüber hinaus ist die Kommunikation über Segmentgrenzen hinweg gestattet. Die nebenläufige Abwicklung von Prozessen ermöglicht einen höheren Gesamtdurchsatz an Nachrichten.

3.7 Qualitäten des Übermittlungsdienstes

Das wichtigste Kriterium bei der Verbindung von PROFIBUS-Segmenten über ein ATM-Netz ist die Beibehaltung der Fähigkeit, Nachrichtenzyklen mit harten Reaktionszeitanforderungen abwickeln zu können. In einem gekoppelten System muß es zwischen Stationen auch

weiterhin möglich sein, Nachrichten in äquidistanten Abständen auszutauschen. Zur Einhaltung dieser Kriterien muß der Übertragungsdienst auf die Anforderungen von PROFIBUS abgestimmt sein. In Abschnitt 2.4.4 wurden die Fähigkeiten von ATM in Bezug auf das Angebot der Zusicherung von Dienstqualitäten und dessen Parameter eingehend vorgestellt. Der erste Schritt zur Bestimmung der auf der ATM-Verbindung geforderten Dienstqualität ist die Analyse des Kommunikationsverhaltens von PROFIBUS.

3.7.1 Analyse des Kommunikationsverhaltens von PROFIBUS

Das Kommunikationsverhalten von PROFIBUS wird in der Hauptsache von bestätigten Diensten bestimmt. Weniger werden Broadcasts und Multicast eingesetzt. Die Kommunikation mit bestätigten Diensten setzt sich beim PROFIBUS aus alternierenden Phasen des Wartens und des Sendens zusammen (Stop-and-Wait-Prinzip) [Fied91, Kleh96, Hoyer94].

Abbildung 29 bis Abbildung 31 zeigen Beispiele von Tokenzyklus und Nachrichtenzyklen aus der Sicht des Geschehens auf dem Übertragungsmedium. Durchgezogene Linien stehen für Telegramme, die sich zum Zeitpunkt auf dem Medium befinden. Unterbrochene Linien kennzeichnen Ruhephasen.

a) Tokenzyklus

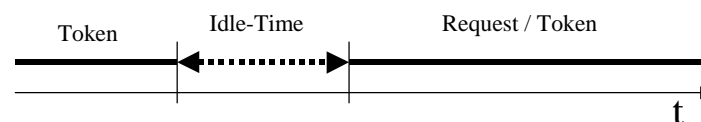


Abbildung 29: Tokenzyklus

Ein Tokenzyklus (Abbildung 29) besteht aus der Sicht des Masters, der gerade das Token weitergibt, aus der Sendezeit für das Tokentelegramm und der Zeit, die der empfangende Master braucht, um entweder das Token seinerseits weiterzugeben (Stationsverzögerung), oder ein Request-Telegramm auszusenden. Für den Master, der das Token weitergegeben hat, ist der Zeitraum zwischen Weitergabe und Feststellen einer Aktivität des adressierten Masters relevant. Bei einer angenommenen Datenrate von 500 Kbit/s bewegen sich die Sendedauer eines Token-Telegramms und die Idle-Zeit etwa in demselben Verhältnis. Typische Idle-Zeiten liegen abhängig vom Gerät zwischen 100 μ s und wenigen Hundert μ s.

b) Nachrichtenzyklus mit Kurzquittung

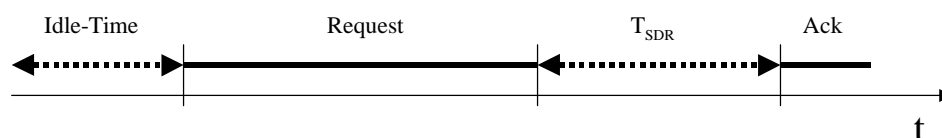


Abbildung 30: Nachrichtenzyklus mit Kurzquittung

Erst bei einerseits langen Telegrammen oder andererseits geringer Datenrate überschreitet die Sendezeit die Stationsverzögerungen. In schwach ausgelasteten Systemen mit wenig Nach-

richtenzyklen überwiegt die Anzahl der Tokenzyklen sehr stark. Das Token zirkuliert unabhängig davon, ob die Master Nachrichten zu versenden haben. Als erste Konsequenz ergibt sich daraus eine entsprechend hohe Anzahl von ATM-Zellen, die Token transportieren, in Verbindung mit dem daraus resultierenden hohen Overhead. Diese Zellen weisen bei identischen Mastern gleiche Abstände auf, die von der Tokensendezeit und der Zeit, die der Master zur Feststellung braucht, daß keine Anforderungen vorliegen.

c) Nachrichtenzyklus mit Datenanforderung

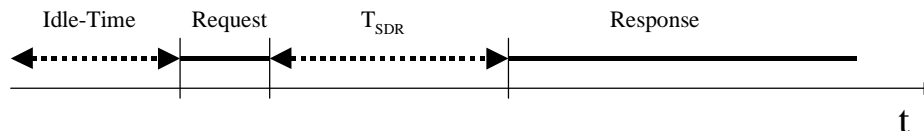


Abbildung 31: Nachrichtenzyklus mit Datenanforderung

Alle drei betrachteten Zyklen a), b) und c) zeigen die Charakteristik des Stop-and-Wait-Prinzips von PROFIBUS.

Unterschiede bei der Dauer von Nachrichtenzyklen ergeben sich, wenn der Requester und der Responder sich in demselben Segment befinden, gegenüber dem Fall, wenn sich beide in verschiedenen Segmenten befinden. Gleiches gilt für die Weitergabe des Tokens. Konsequenzen für die Parametrierung des PROFIBUS, die daraus entstehen können, werden im Abschnitt 5.5.4 detailliert behandelt.

Im allgemeinen sind die im PROFIBUS zu übertragenden Datenmengen sehr klein. Übliche Telegrammgrößen im PROFIBUS liegen bei 30 Byte. Daneben werden Token (3 Byte) und Acknowledgement (Ack, 1 Byte) gesendet. Token machen, wie bereits erwähnt, einen nicht unerheblichen Anteil der Telegramme aus.

Setzt man die im Vergleich zu anderen Anwendungen sehr geringe Länge der Dateneinheiten in Bezug zur Anzahl der ATM-Zellen, die aus einer Dateneinheit resultieren, ergeben sich sehr kurze Bursts. Meistens werden die Telegramme in nur eine Zelle verpackt werden können. Die mit maximal 255 Byte langen Telegramme ergeben Bursts von somit nur 6 Zellen Länge.

Bildet man ein einzelnes Segment als eine Datenquelle ab, so erhält man eine periodisch sendende Quelle mit unregelmäßigen Abständen zwischen den Dateneinheiten. Aus der Sicht der Brücke sind die Zwischenankunftszeiten der Telegramme verteilt in einem Bereich zwischen T_{id} und T_{SL} . T_{id} wird erreicht, wenn sich der Responder bzw. die bei der Tokenweitergabe adressierte Station in demselben Segment befinden. Eine Zwischenankunftszeit von T_{SL} tritt dann auf, wenn eine Übertragungswiederholung aufgrund des abgelaufenen Slot-Timers initiiert wird. Inzwischen fand wegen des Stop-and-Wait-Prinzips kein weiterer Datenverkehr statt.

Zusammenfassung

Aus der Perspektive des Übertragungsmediums ist der PROFIBUS-Datenverkehr insgesamt von alternierenden Phasen des Sendens von Daten und des Wartens auf Reaktionen bestimmt. Typischerweise basiert der Datenaustausch zwischen PROFIBUS-Geräten nicht auf Datenströmen, sondern auf äquidistanten oder sporadisch auftretenden Nachrichtenzyklen mit vor-

hersehbarem Datenvolumen. Quittungen vom Umfang eines Bytes bilden die kürzesten Telegramme. Längstens bilden die Telegramme aus der Sicht einer ATM-Verbindung eine Sequenz von 6 hintereinanderfolgenden Zellen, die mit der maximal möglichen Datenrate von 12 Mbit/s ausgesendet werden können.

Bezüglich der wichtigsten Kriterien zur Charakterisierung des Datenverkehrs faßt die folgende Tabelle diese für den PROFIBUS zusammen.

Kriterium	PROFIBUS-Eigenschaft
Anforderung an Übertragungsdauer	Harte Anforderungen
Länge der Dateneinheiten	1 bis 255 Byte
Nachrichtentyp	Regelmäßig periodisch, Spontan
Maximale Übertragungsdauer gefordert	Indirekt durch Slot-Zeit vorhanden
Schwankung der Übertragungsverzögerung zwischen Nachrichten	Nicht kritisch, jedoch Mindestabstand entsprechend Idle-Zeit
Abhängigkeiten zwischen Nachrichten	Durch Nachrichtenzyklen und Stop-and-Wait-Prinzip bestimmt
Zahl der Empfänger	Unicast, Multicast und Broadcast

Tabelle 5: Kriterien des Kommunikationsverhaltens von PROFIBUS

3.7.2 Abbildung der PROFIBUS Kommunikationscharakteristik auf ATM-Dienstqualitäten

Unter der Prämisse, die Dauer von Nachrichtenzyklen und insgesamt die Systemreaktionszeiten so wenig wie möglich zu beeinflussen, muß der Transport der PROFIBUS-Telegramme durch das jeweilige ATM-Netz erfolgen. Es wurde bereits erwähnt, daß ATM die Aushandlung definierter Dienstqualitäten während der Etablierung einer Verbindung gestattet und in diesem Verfahren festgelegte Parameter für die Dauer der Übertragung zusichert. Der erste Schritt, die Bestimmung der qualitativen Anforderungen von PROFIBUS, wurde im vorangegangenen Abschnitt beschrieben. Dieser Abschnitt ist mit der Gegenüberstellung der von ATM gebotenen Möglichkeiten zur Wahl von Dienstqualitäten zu den Anforderungen befaßt und hat das Ziel der Herleitung einer geeigneten Abbildung.

Im Ergebnis der Analyse des Datenverkehrs von PROFIBUS wurde als Hauptcharakteristik das, bedingt durch das Stop-and-Wait-Verfahren, nicht kontinuierliche Aussenden von Daten unterschiedlich langer Telegramme festgehalten.

Bei der Wahl einer zu verwendenden ATM-Dienstklasse (in der Terminologie der ITU-T entsprechend Tabelle 4) fällt demnach die Wahl auf den Dienst der Klasse B, da eine Zeitbeziehung erforderlich ist und der Verkehr keine konstante Datenrate aufweist.

In der Terminologie des ATM-Forums [TM40], die im weiteren verwendet wird, entspricht dies der Dienstkategorie VBR mit der Spezialisierung rtVBR. Bei der Auswahl disqualifizieren sich die Kategorien UBR und ABR aufgrund der fehlenden Echtzeitfähigkeit. Ebendies gilt auch für nrtVBR. Es bleibt die Wahl zwischen CBR und rtVBR für weitere Untersuchungen. Eine CBR-Datenquelle wird durch die Wahl der Spitzenzellenrate in Verbindung mit einem tolerierbaren maximalen Cell Transfer Delay und einer tolerierbaren Zellenverlustrate charakterisiert. Bei rtVBR Datenquellen kommt noch ein Parameter, die andauernd erlaubte

Zellenrate, (sustainable cell rate, SCR) hinzu. Beide Kategorien erfüllen Echtzeitanforderungen. Die Nutzung der CBR Dienstkategorie verlangt jedoch zur Taktgewinnung Anwendungen, die einen konstanten Datenstrom erzeugen, was aber bei PROFIBUS nicht der Fall ist. Daher fällt die Wahl auf die Kategorie rtVBR. Dies ermöglicht dem ATM-Netz zugleich die Ausnutzung von statistischen Schwankungen über alle VBR Verbindungen mit dem Ziel der besseren Auslastung der Ressourcen, birgt aber gleichzeitig das Risiko von temporären Überlastsituationen.

Overhead

In Abschnitt 3.7.1 wurden Aussagen zur Paketlänge von PROFIBUS Telegrammen getroffen. In den meisten Fällen, wenn die Gesamtlänge eines PROFIBUS-Telegramms bis maximal 44 Byte beträgt, wird das Telegramm in den Nutzdatenteil einer ATM-Zelle verpackt werden können. Die sehr kurzen Telegramme provozieren trotz der bereits geringen Zellengröße von ATM einen großen Overhead, beispielsweise ein Token in einer ATM-Zelle oder im Extremfall der Transport eines Ack. Zusätzlicher Overhead auf den ATM-Verbindungen ergibt sich durch den Austausch von Kontrollinformationen zwischen den Brücken.

Spitzenzellenrate, andauernd erlaubte Zellenrate und Burst Toleranz

Die beim Verbindungsaufbau vereinbarte Spitzenzellenrate (PCR) entspricht der gewünschten maximalen Senderate. Anders ausgedrückt ist die Spitzenzellenrate der Kehrwert des minimalen zeitlichen Abstandes T zwischen der Aussendung zweier aufeinanderfolgender Zellen einer Verbindung. Die größte bei PROFIBUS verwendete Datenrate ist 12 Mbit/s. Eine weitere häufig eingesetzte Datenrate ist 500 Kbit/s. Kann das PROFIBUS-Telegramm in nur einer auszusendenden Zelle übertragen werden, spielt die Spitzenzellenrate keine Rolle, weil keine Zelle weiter folgt. Die betreffende Zelle kann sofort übertragen werden. Bei zwei und mehr aufeinanderfolgenden Zellen wirkt sich der Abstand zwischen zwei Zellen auf die Verzögerung der gesamten Dateneinheit durch das ATM-Netz aus. Optimal im Hinblick auf diese Verzögerung ist das lückenlose Aussenden der Zellen mit maximierter Spitzenzellenrate. Minimal ist die Zellenrate entsprechend der bei PROFIBUS verwendeten Datenrate zu wählen.

Um eine effiziente Ausnutzung der Ressourcen zu gestatten, kann für Quellen, die nicht mit konstanter Datenrate senden, durch Angabe von zusätzlichen Parametern die Charakteristik der Quelle detaillierter beschrieben werden [Mamm97]. Für eine VBR-Quelle dienen dazu die Parameter andauernd erlaubte Zellenrate (Sustainable Cell Rate, SCR) und Burst Toleranz (BT). Bei mit schwankender Zellenrate sendenden Quellen liegt die durchschnittliche Zellenrate über einen längeren Zeitraum betrachtet unterhalb der Spitzenzellenrate. Dieser Wert ist die andauernd erlaubte Zellenrate (SCR).

Die Burst Toleranz gibt einen Zeitrahmen an, in dem Abweichungen von der andauernd erlaubten Zellenrate auftreten können. Der Parameter wird in Bezug auf die SCR definiert und legt eine obere Grenze für die Burst-Dauer mit maximal der Spitzenzellenrate fest. Eine maximale Anzahl von Zellen, die mit der Spitzenzellenrate hintereinander ausgesendet werden (Maximum Burst Size MBS), wird dadurch festgelegt. Gemäß den Verkehrsmustern von PROFIBUS wechseln sich auf einer ATM-Verbindung burstartige Phasen mit Ruhephasen ab, so daß über einen längeren Zeitraum betrachtet die beobachtbare Zellenrate weit unterhalb der Spitzenzellenrate liegt. Die maximale Größe eines Bursts beträgt 6 Zellen für das mit 255 Byte längste PROFIBUS-Telegramm, die mit der Spitzenzellenrate ausgesendet werden können. Somit läßt sich eine Parametrierung in folgender Weise vornehmen.

$$SCR = 1/T_s \text{ und } PCR = 1/T$$

Bei beiden wird aus den Zellenraten der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zellen des Datenstromes bestimmt. Der Zusammenhang zwischen BT, MBS, T_s und T ist in [TM40] so angegeben.

$$MBS = 1 + (BT / (T_s - T)) \quad [\text{Zellen}]$$

Bei der durch PROFIBUS vorgegebenen MBS läßt sich die Burst Toleranz dann entsprechend aus

$$BT = (MBS - 1) * (T_s - T) \quad \text{bestimmen [TM40].}$$

An der Netzzugangsstelle wird überprüft, ob der eingespeiste Datenstrom sich konform zu den ausgehandelten Werten verhält. Dazu wird ein Algorithmus (Generic Cell Rate Algorithm GCRA) verwendet, der einerseits untersucht, ob die Zwischenankunftszeit von Zellen ein vereinbartes Minimum nicht unterschreitet. Andererseits fließt hier auch die Burst Toleranz ein. Die Funktion des Algorithmus ist mit dem Modell des „Leaky Bucket“ assoziiert. Zwei Parameter I und L beschreiben die Funktion. Der „Leaky Bucket“ leert sich gleichmäßig. Bei Ankunft einer Zelle erhöht sich der Flüssigkeitsspiegel um I Maßeinheiten. Eine eintreffende Zelle gilt als nicht konform, wenn bei Eintreffen der Zelle der Flüssigkeitsspiegel höher als L ist, der Eimer überlaufen wird. L kennzeichnet damit das Volumen des Eimers bezogen auf die Rate des Auslaufens und I die Menge des Zulaufs. Um im Sinne des Algorithmus konform zu sein, darf die maximale Anzahl Zellen analog zu L mit PCR analog zu I gesendet werden, wobei über einen längeren Zeitraum gesehen die Zellenrate SCR betragen muß. Dies hat zur Folge, daß zwei dicht aufeinanderfolgende Bursts maximaler Länge nicht konform sein müssen, auch wenn dazwischen eine Phase ohne Zellenaussendung war. Erst wenn der Eimer leer gelaufen ist, ist ein Burst mit maximaler Länge konform.

Zellenverluste

Zu Zellverlusten kommt es in erster Linie, wenn die Pufferspeichergröße in ATM-Switches nicht ausreicht, um alle ankommenden Zellen zu speichern. Da die Pufferspeichergröße anhand statistischer Methoden bemessen wird, kann es in Überlastsituationen zum Verwerfen von Zellen kommen. Das CLP-Bit im Zellenkopf klassifiziert Zellen in hochprior (Bit=0) und niedriprior. Garantien bezüglich des Verlustes werden nur für hochprior Zellen gegeben. Daher sollten alle Zellen, die PROFIBUS-Telegramme transportieren den Wert 0 im CLP-Bit haben. In der AAL-Schicht kann der Verlust von einer oder mehreren Zellen festgestellt werden. Der Verlust von bereits einer Zelle bedingt aber immer die Neuaussendung nicht nur der einen Zelle, sondern der gesamten Dateneinheit, zu der die Zelle gehört. Wenn ein PROFIBUS Telegramm über mehrere Zellen verteilt ist und nur eine Zelle tatsächlich verloren geht muß demzufolge die gesamte Dateneinheit neu ausgesendet werden. Da die PROFIBUS-Telegramme meist aber nur in einer Zelle transportiert werden, ist ein Verlust in diesen Fällen nicht durch ATM feststellbar, sondern muß von den PROFIBUS-Geräten bemerkt und korrigiert werden. Typische Zellverlustraten auf ATM-Verbindungen liegen im Bereich von 10^{-7} bis 10^{-10} [RaWa97].

Maximale Zellverzögerung und Zellverzögerungsschwankungen

Die Übertragungsverzögerung einzelner Zellen durch das ATM-Netz ist nicht immer gleich, obwohl nach dem Verbindungsaufbau immer derselbe Weg durchlaufen wird. Die statistischen Schwankungen in der Übertragungsverzögerung resultieren aus Interferenzen, die durch

andere Datenströme verursacht werden, die um dieselbe Ressource konkurrieren, die Ausgangsports von ATM-Switchen. Bei hoher Auslastung eines Switch und temporär hohen Interferenzen füllen sich die Warteschlangen an den Ausgangsports. Weiterzuleitende Zellen werden eingereiht und erfahren so eine Verzögerung.

Für jede Verbindung kann jedoch eine maximal zulässige Zellverzögerung am UNI ausgehandelt werden. Für die weiteren Betrachtungen sind die Dienstgüteparameter Cell Transfer Delay (CTD) und Cell Delay Variation (CDV) von Bedeutung. Eng mit beiden verknüpft ist die Cell Loss Ratio (CLR) von besonderer Relevanz für die Kopplung von PROFIBUS-Segmenten über ATM-Verbindungen.

CTD umfaßt die gesamte Dauer, die sich eine Zelle innerhalb des ATM-Netzes aufhält. Hierzu zählt die Laufzeit der Zelle zwischen den Switches und die Zeit, welche die Zelle innerhalb der Warteschlangen der Switches und der Schaltmatrizen zubringt. Dabei besteht CTD aus einem fixen Anteil und einem variablen Teil, der durch den statistischen Aufenthalt innerhalb von Warteschlangen bestimmt wird. Innerhalb der rtVBR Dienstklasse läßt sich aus der Verletzung des CTD Parameters ableiten, daß über eine bestimmte maximale Verzögerung innerhalb des ATM Netzes hinaus die Zellen für die Anwendung nicht mehr zu gebrauchen sind. Der Parameter Peak-to-Peak CDV beschreibt die Schwankungsbreite des CTD von Zellen innerhalb desselben Datenstromes, womit beispielsweise die für Audio-Anwendungen wichtige Synchronisation überwacht wird. Für PROFIBUS-Anwendungen ist die Schwankung des CTD zwar aus Sicht der Anwendung von nachrangiger Bedeutung. Wird aber eine Zelle aus einem Telegramm so stark verzögert, daß die nachfolgende Zelle zu dicht hinter der letzten Zelle des vorherigen Telegramms eintrifft, so kann die von PROFIBUS verlangte Ruhezeit auf der Leitung nur mittels einer Shaping-Funktion (Spacing) durch die Brücke erreicht werden. Eine CDV kleiner als die Idle-Time ist anzustreben, um ohne Shaping-Funktion in der Brücke auszukommen.

3.7.3 Verzögerungen durch ATM

Die durch die Verbindung von Teilsegmenten oder unabhängigen Segmenten erzielbaren Vorteile und erweiterten Verwaltungsmöglichkeiten für PROFIBUS müssen durch die Hin- und Rücknahme von zusätzlichen Verzögerungen der Nachrichtenzyklen und damit zugleich für die Reaktionszeiten erkauft werden. An dieser Stelle soll eine Betrachtung der Verzögerungen auf makroskopischer Ebene erfolgen. In einem späteren Abschnitt sind die Verzögerungen Gegenstand detaillierter Darstellungen, insbesondere die Dauer von Nachrichtenzyklen und die Auswirkungen dessen auf das Verhalten des Gesamtsystems.

Im Hinblick auf die geforderte Erfüllung harter Zeitanforderungen an die Übertragung liefert ATM mit den im vorangegangenen Abschnitt betrachteten Kategorien CBR und rtVBR zwei verwendbare Dienstklassen, wobei die Wahl auf rtVBR gefallen ist.

Für die Backbonefunktion ist es wichtig, die Übertragung möglichst verzögerungsarm und effizient vonstatten gehen zu lassen. Die bei ATM auftretenden Ursachen für Verzögerungen werden nachfolgend beschrieben. Die Verzögerung innerhalb eines ATM-Netzwerkes setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die zum Teil statischen, aber auch variablen Charakter besitzen. Ausschlaggebend für den variablen Verzögerungsanteil ist vor allem die jeweilige Lastsituation im Netz bzw. der aktuelle Lastzustand der Vermittlungsstellen. Vier Verzögerungsarten bilden die Gesamtverzögerung, die ein PROFIBUS-Telegramm auf dem Weg durch das ATM-Netz erfährt.

- **Übertragungsverzögerung:** Dies ist die Leitungsverzögerung, bestimmt durch den Abstand von Sender und Empfänger. Der Parameter ist statisch.

- Die **Paketierverzögerung** hängt von der Paketlänge und der Geschwindigkeit ab, mit der die Quelldaten erzeugt werden.
- **Vermittlungsverzögerung** - Der feste Bestandteil dieser Verzögerung wird von den Vermittlungsstellen (Switches) im ATM-Netz bestimmt und hängt von deren Architektur bzw. von deren Vermittlungsverfahren ab. Die **Warteschlangen-Verzögerung** bildet einen variablen Anteil an der Gesamtverzögerung, der durch die aktuelle Lastsituation der beteiligten Switches bestimmt wird. Insbesondere die Konkurrenz um Ausgangsleitungen der Switches schlägt sich hier nieder. Konkurrierende Zellen aus mehreren Datenströmen, die sich um einen Ausgangsport bewerben und deren Eintreffrate insgesamt größer als die Zellenrate des Ausgangsports ist, sind von der Warteschlangen-Verzögerung betroffen. Entscheidende Kriterien für die Dauer der Verzögerung durch den Aufenthalt in der Warteschlange sind der aktuelle Füllstand der Warteschlange sowie der Gesamtrate der eintreffenden Zellen mehrerer Ströme. Im Extremfall, wenn die Warteschlangenkapazität erschöpft ist, muß ein Switch nur mit dem Verwerfen von Zellen darauf reagieren.
- Die **Entpaketierverzögerung** gilt analog zur Paketierverzögerung

3.7.4 Übertragungsfehler und Zellverluste in ATM

Priorisierung von Zellen

Für PROFIBUS ist jedes Telegramm von hoher Relevanz. Verluste, schon von nur einer Zelle, können ernste Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben und sind deshalb stark einzugrenzen. Gleichzeitig können angesichts der strengen Zeitkriterien auch größere Verzögerungen nicht toleriert werden. Aus Sicht der Übertragung durch das ATM-Netz gilt es deshalb dafür zu sorgen, daß Zellen, die zu PROFIBUS Datenströmen gehören, vorrangig behandelt werden. Auch innerhalb des PROFIBUS Datenverkehrs muß beispielsweise den Token eine höhere Priorität eingeräumt werden, da deren wiederholter Verlust im weiteren Verlauf z.B. zu einem Neuanlauf des Systems führen kann und damit zu Unterbrechungen und erheblichen Auswirkungen auf das Gesamtsystem führen kann. Durch Ausnutzung der Fähigkeiten von ATM Vermittlungsstellen können bereits Vorkehrungen zur bevorzugten Behandlung von Zellen einzelner Verbindungen bzw. Klassen von Datenströmen getroffen werden. So werden von den Schalteinheiten entsprechend den Werten in Feld Cell Loss Priority (CLP) des ATM-Zellenkopfes innerhalb der einzelnen Dienstklassen zwei Prioritäten unterschieden und weiterhin bei der Auswahl eventuell zu verwerfender Zellen abgestuft nach der Zugehörigkeit zu Dienstklassen unterschieden. In der ITU-T Empfehlung I.371 ist vorgesehen, die Anwendung des CLP Mechanismus und des „Selective Cell Discard“ vom Verbindungstyp (Dienstklasse) abhängig zu machen. Die Auswertung des CLP Bits ist beispielsweise bei CBR Verbindungen nicht vorgesehen. Daher gelten bei CBR Verbindungen für alle Zellen die gleichen Garantien bezüglich der Zellverlustwahrscheinlichkeit. Bei den übrigen Dienstklassen kann der CLP-Prioritäts-Mechanismus verwendet werden. Dies unterstreicht einmal mehr die Wahl der Dienstkategorie rtVBR.

Viele Switches verwenden das Schwellwertverfahren im Zusammenhang mit der Verwaltung von Warteschlangen. Beim Schwellwertverfahren wird eine Zelle nur dann in den Pufferspeicher übernommen, wenn der Füllstand des Speichers bei Ankunft der Zellen unterhalb einer bestimmten Schwelle von M Zellen liegt. Hochprioritäre Zellen werden übernommen, solange der Speicher nicht voll ist. In Überlastsituationen werden damit die Zellverlustanforderungen für hochprioritäre Verkehr so lange wie möglich gewahrt, indem zunächst niederprioritäre Zellen

verworfen werden, bezeichnet als Selective Cell Discard. Auf den PROFIBUS bezogen sollten Token-Zellen höchste Priorität genießen. Gleichzeitig sollte aufgrund der allgemein sehr strengen Anforderungen des Feldbusverkehrs an die Übertragungsverzögerung dieser gegenüber anderen Anwendungen bevorzugt behandelt werden. Konkret heißt das, die Zellen von PROFIBUS Datenströmen nicht nur im Falle des Verwerfens von Zellen zu schützen, sondern auch die Aufenthaltsdauer solcher Zellen in Warteschlangen oder Zwischenspeichern zu minimieren. Prinzipiell sind die potentiellen Auswirkungen einer solchen Strategie auf andere Datenströme aufgrund der Charakteristik des PROFIBUS Datenverkehrs (kurze Bursts) nur gering. Bei einer angenommenen Warteschlangenkapazität von 1000 Zellen pro Port hat ein Burst von maximal 6 Zellen kaum Auswirkungen auf die Verzögerung anderer Zellen bzw. er wird nicht einmal ein Prozent Kapazität einnehmen. Darüber hinaus läßt die On-Off-Charakteristik von PROFIBUS-Datenverkehr Zeit zur Abarbeitung der Datenströme niedriger Priorität. Beim Design zukünftiger ATM-Vermittlungssysteme können derartige Strategien berücksichtigt werden. Ähnliche Ansätze zur priorisierten Behandlung von Datenströmen basierend auf Informationen, die aus höheren Protokollschichten gewonnen werden, sind aktuell Gegenstand von Forschungsarbeiten im Bereich der Differentiated Services sowie des Layer 4+ Switching. In dieser Hinsicht ist dann ein zu übertragendes PROFIBUS Telegramm als AAL-Dateneinheit ergänzt um Informationen anzusehen, die es einem Vermittlungssystem erlauben, Prioritätsalgorithmen anzuwenden.

(Early) Packet discard:

Ein weiterer Mechanismus zur Warteschlangenverwaltung ist das Verwerfen erkennbar unvollständiger Dateneinheiten (Early Packet Discard). Am Payload Type Feld im ATM-Zellenkopf läßt sich erkennen, wann eine neue Dateneinheit der AAL-Schicht beginnt. Bei Anwendung dieses Verfahrens wird eine AAL-Dateneinheit nur dann akzeptiert, wenn bei Ankunft der ersten Zelle einer AAL-PDU der Füllstand der Warteschlange so gering ist, daß mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, daß das ganze Paket in die Schlange paßt. Um dies festzustellen, wird bei Ankunft der ersten Zelle eines Paketes der Füllstand mit einem vordefinierten Schwellwert verglichen. Überschreitet der Füllstand der Warteschlange diesen Wert, so werden alle Zellen dieses Paketes verworfen. Die Implementation dieses Mechanismus bei ATM-Vermittlungsstellen führt aus den bereits mehrfach erwähnten Gründen der kurzen PROFIBUS-Dateneinheiten zu Vorteilen für den PROFIBUS-Datenverkehr, da dieser mit nur ein bis sechs Zellen pro zu übertragendem Telegramm wesentlich weniger von den Verwerfungen betroffen sein wird. In der Praxis wird der freie Speicherplatz in den Warteschlangen mit hoher Wahrscheinlichkeit ausreichen, um diese wenigen Zellen aufzunehmen.

Zur allgemeinen Entlastung eines ATM-Netzes kann das Verwerfen der restlichen Zellen beitragen, die zu einer Dateneinheit gehören, die erkennbar nicht mehr vollständig zusammengesetzt werden kann, weil bereits eine oder mehrere Zellen fehlen und damit ohnehin im Empfangssystem verworfen wird. In solchen Fällen kann das Verwerfen bereits in Vermittlungsstellen geschehen, um das Netz nicht weiter mit den eigentlich wertlosen Zellen zu belasten. Dazu müssen die Schalteinheiten aber die Zellen ansehen und die gesamte Dateneinheit isoliert betrachten.

3.7.5 Fehlerbehandlung

Fehlererkennung und Reaktion durch die Brücken

Grundsätzlich ist zur Beibehaltung der Transparenz davon auszugehen, die Fehlerkontrolle und Fehlerkorrektur weiterhin durch die PROFIBUS-Geräte durchführen zu lassen. Übli-

cherweise erwartet der Initiator eines Nachrichtenzyklus bei einem bestätigten Dienst vom angesprochenen PROFIBUS-Teilnehmer innerhalb einer bestimmten Zeitspanne (Slot-Zeit) das Eintreffen der Quittung oder der angeforderten Daten. Bleibt diese aus, ist entweder das Anforderungstelegramm oder die Quittung verloren gegangen oder verspätet. In diesen Fällen wird das Anforderungstelegramm erneut gesendet und auf das Eintreffen der Quittung/Antwort gewartet. Trat während der Phase, in der sich das Telegramm möglicherweise verteilt über mehrere Zellen im ATM-Netz befand, ein Fehler auf, z.B. ein Zellenverlust aufgrund eines Warteschlangenüberlaufs, so kann die entfernte Brücke dies bei der Reassemblierung des Telegramms bemerken. Wenn vorausgesetzt werden kann, daß die Brücken sich über eine fehlerhafte Übertragung verständigen und eine erneute Übertragung noch innerhalb der Slot-Zeit abgewickelt werden kann, ist es möglich, eine wiederholte Aussendung für diesen Fall von den Brücken vornehmen zu lassen. Die PROFIBUS-Teilnehmer bleiben jedoch von diesem Mechanismus unberührt. Alle Zellen des kompletten Telegramms müßten von der Brücke erneut ausgesendet werden, mit der Hoffnung, daß diese nun vollzählig bei der entfernten Brücke ankommen. Dies ist besonders dann effektiv, wenn ein Telegramm in mehrere PROFIBUS-Segmente gesendet wird und der Fehler (Zellenverlust) nur ein Segment betrifft.

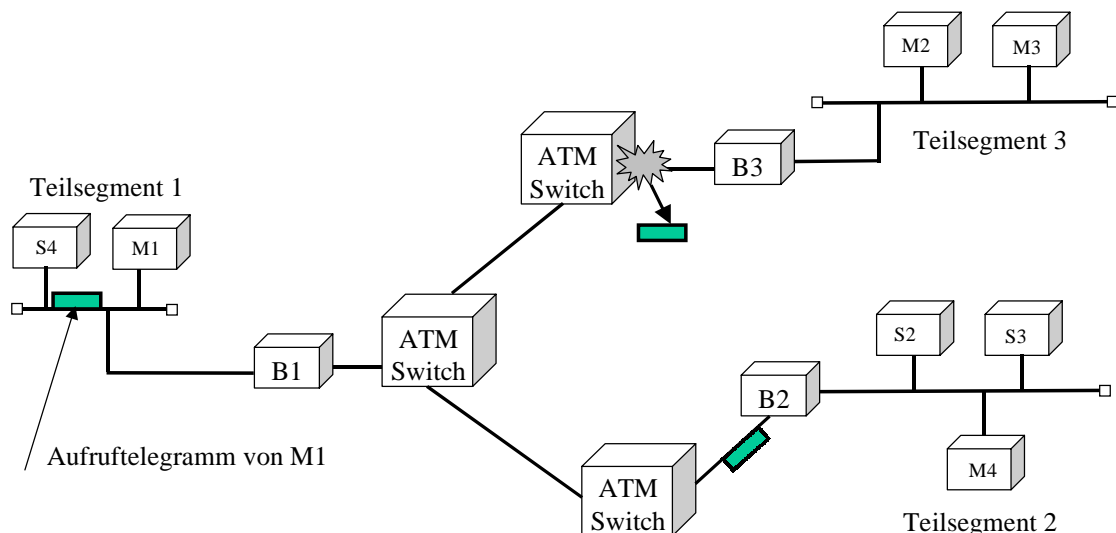


Abbildung 32: Zellenverlust in einem Teilsegment

Die Abbildung 32 zeigt jedoch, warum ein solcher Mechanismus in einem transparent gekoppelten System dennoch nicht eingesetzt werden sollte und wenn doch, dann nur mit einer Vorkehrung, die sichert, daß die Reihenfolge der Telegramme beibehalten wird. Die Abbildung 32 repräsentiert die Situation in einem transparent gekoppelten PROFIBUS, in dem Teilnehmer M1 ein Anforderungstelegramm an Teilnehmer S4 sendet. Das Telegramm wird, wie es der Standard vorschreibt, an alle Teilsegmente gesendet und kommt bei Segment 2 fehlerfrei, nicht jedoch bei Segment 3 fehlerfrei an. Wegen der kürzeren Übertragungszeit hat nun Teilnehmer S4 bereits die Antwort gesendet, bevor die Benachrichtigung über die fehlerhafte Übertragung von Brücke B3 die Brücke B1 erreicht (Abbildung 34). Sendet nun B1 das fehlerhaft bei B3 angekommene Telegramm erneut aus, so trifft dies nach dem Antworttelegramm von Teilnehmer S4 in Teilsegment 3 ein. Ein inkonsistenter und zugleich nicht standardkonformer Zustand ist damit erreicht (Abbildung 33).

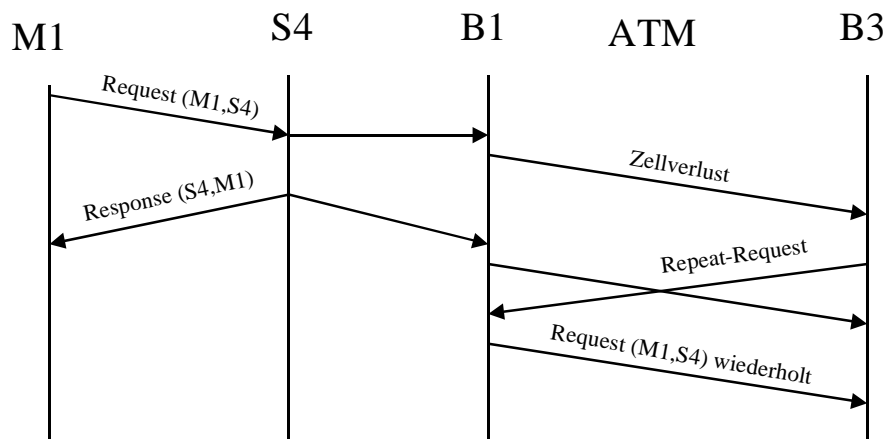


Abbildung 33: Übertragungswiederholung durch die Brücken

Für den Fall, daß das PROFIBUS-Telegramm in einer Zelle übertragen wird, z.B. ein Token, kann die Übertragungswiederholung nicht angewendet werden, da die entfernte Brücke das Telegramm nicht erwartet und damit das Ausbleiben des Telegramms nicht bemerkt und deshalb keine Rückkopplung geben kann.

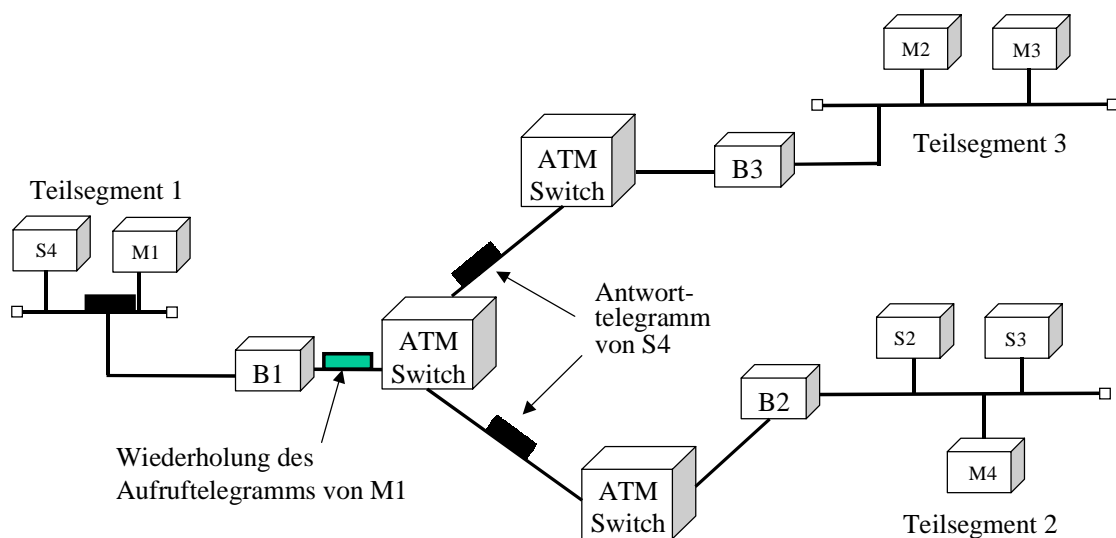


Abbildung 34: Aufrufwiederholung trifft nach Antwort von S4 ein

Eine gesicherte Auslieferung der Nachrichten an alle Teilnehmer, wie sie dieses Konzept erfordert, kann wegen der fehlenden Verbindungsorientierung in der FDL-Schicht nicht geboten werden. Dadurch entstehen für den PROFIBUS folgende Konsequenzen, wobei zwei Fälle zu unterscheiden sind. Im Fall a) erhält der adressierte Teilnehmer die Nachricht, welche jedoch nicht bei allen anderen Teilnehmern ankommt. Der adressierte Teilnehmer antwortet entsprechend der erhaltenen Nachricht und diese Nachricht erreicht nun alle Teilnehmer. Den Stationen, welche die erste Nachricht nicht erreichte, entsteht dadurch eine Informationslücke, die

durch das Eintreffen der Antwort des adressierten Teilnehmers geschlossen wird. Angenommen ein Teilsegment ist durch eine temporäre Stausituation auf einer der Verbindungen betroffen, so wirkt sich diese Stausituation erst ernsthaft aus, wenn sie mehr als drei Slot-Zeiten andauert, denn für einen Tokenzyklus sind nur maximal zwei Wiederholungen vorgesehen. Sind diese erfolglos verstrichen, so wird versucht, das Token an den übernächsten Master in der LAS weiterzugeben. Dadurch ist der eigentlich adressierte Master um seine Tokenhaltezeit gebracht und kann keine Nachrichtenzyklen absetzen. Darüber hinaus wird er aus der Liste der aktiven Stationen seines Vorgängers gestrichen und erst bei einem der nächsten GAP-Zyklen wieder von seinem Vorgänger angesprochen. Ein vom Gesamtsystem getrenntes Segment, das für die Dauer der Aus-Zeit keine Busaktivität wahrnimmt, beginnt sich zu reinitialisieren.

Im Fall b) erreicht das Aufforderungstelegramm nicht das Teilsegment, in dem sich der adressierte Teilnehmer befindet. Ist die Übertragung zu bestätigen, und bleibt die Antwort oder Quittung aus, so löst der Aufrufer eine erneute Übertragung aus. Infolge dessen wird auch das Wiederholungstelegramm bei den anderen Teilnehmern eintreffen. Diese beachten es jedoch nicht, wegen des nicht veränderten FC Bits im Telegrammkopf, das eine Wiederholung signalisiert.

Um die andauernde Trennung eines Segmentes zu erkennen, tauschen die Brücken in definierten Abständen von mehreren Sekunden Lebenszeichen aus. Dazu muß auch die bewußte An- oder Abmeldung eines Segmentes allen beteiligten Brücken mitgeteilt werden. Das Ausbleiben der Lebenszeichen signalisiert eine Leitungsunterbrechung. Gleichzeitig können die Brücken die Aktivität im angeschlossenen PROFIBUS-Segment durch Mitlesen auf dem PROFIBUS-Port überwachen.

3.8 Umsetzungsmodi zwischen Telegrammen und Zellen

Bei der Umsetzung von Telegrammen in Zellen durch die Brücken kann zwischen dem Block-Modus und dem Strom-Modus unterschieden werden. Im Blockmodus liest die Brücke erst das komplette Telegramm vom PROFIBUS ein und beginnt danach mit der Übergabe der Dateneinheiten an die AAL-Schicht. Analog verhält sich die Brücke bei der Aussendung des PROFIBUS-Telegramms. Die Brücke wartet den Empfang aller zu einem Telegramm gehörenden Zellen ab und beginnt erst dann mit der Aussendung des Telegramms.

Im Gegensatz dazu beginnt die Brücke im Strom-Modus bei Telegrammen, die größer als der Nutzdateninhalt einer Zelle sind, sofort mit der Übergabe der ersten Dateneinheit an die AAL-Schicht, wenn die ausreichende Anzahl Oktetts des Telegramms vom PROFIBUS eingelesen wurden. Beim ATM-seitigen Empfang beginnt die Brücke im Strom-Modus mit der Aussendung des PROFIBUS-Telegramms bereits bevor alle Zellen empfangen wurden.

3.8.1 Blockmodus

Die Funktionsweise des Blockmodus läßt sich anhand von Abbildung 35 folgendermaßen verdeutlichen.

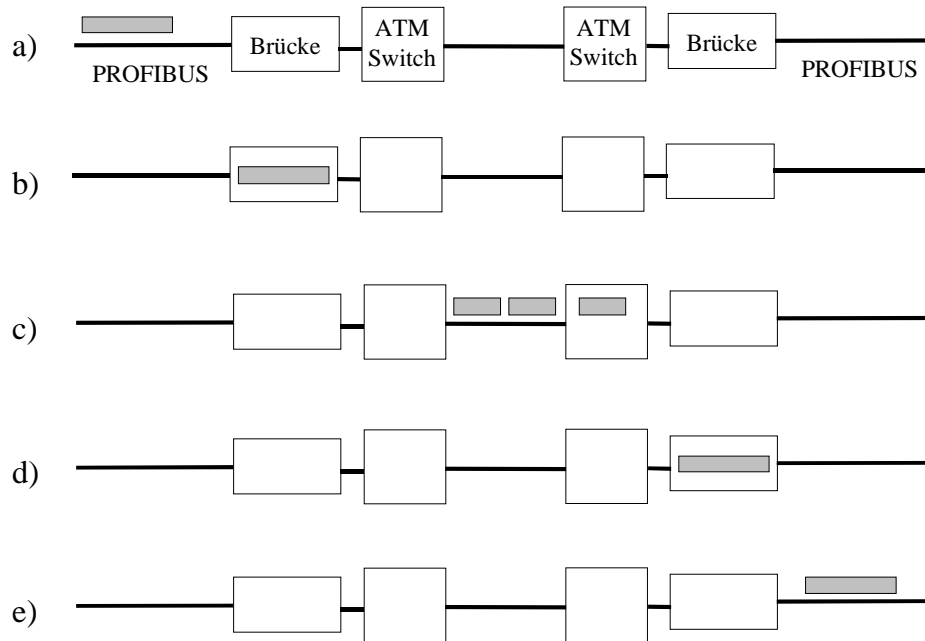


Abbildung 35: Zellenübertragung im Block-Modus

Ein PROFIBUS-Teilnehmer beginnt mit dem Senden des Telegramms in Abbildung 35 a). Die Brücke erkennt den Telegrammanfang und liest das vollständige Telegramm ein und puffert es. Danach übergibt die Brücke das gesamte Telegramm als AAL-Dienstdateneinheit zusammen mit Steuerinformationen der AAL-Schicht b).

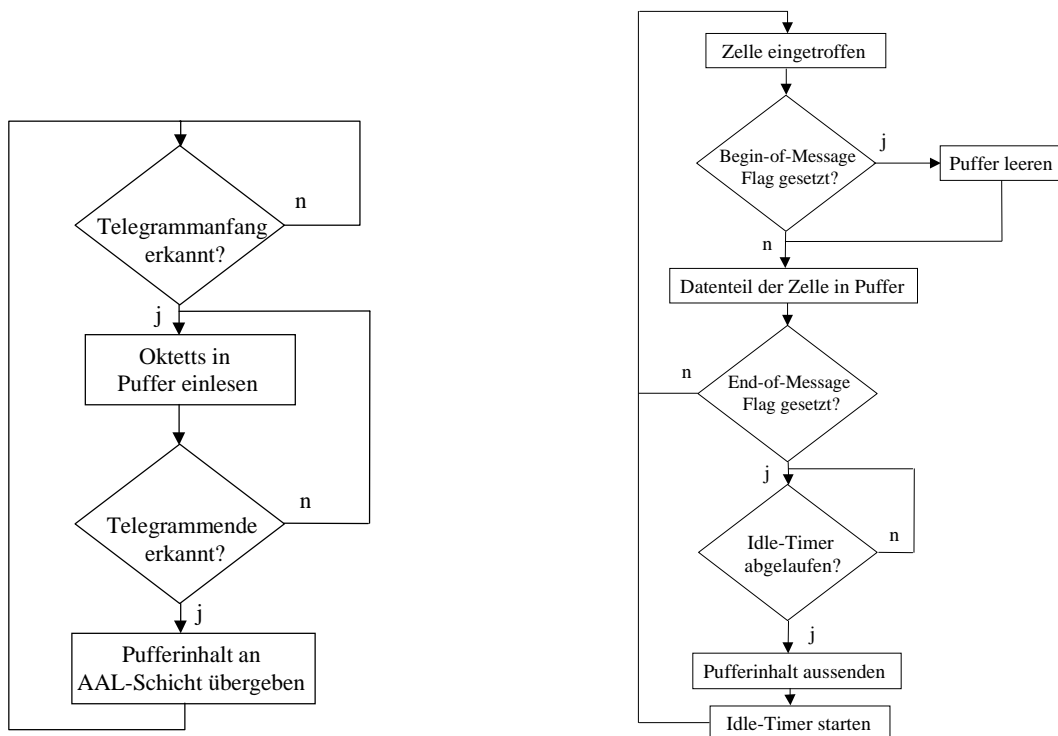


Abbildung 36: Arbeitsweise des Block-Modus bei Empfang vom PROFIBUS (links) und Senden auf PROFIBUS (rechts)

Daraufhin werden die einzelnen Zellen mit der am UNI festgelegten Zellenrate in Richtung ATM-Netz ausgesendet c). Auf der empfangenden Seite d) wird das Eintreffen aller zu dem Telegramm gehörenden Zellen abgewartet, bevor diese reassembliert werden und mit dem Aussenden des PROFIBUS Telegramms begonnen wird.

3.8.2 Strom-Modus

Die Brücke sollte bei langen Telegrammen nicht warten, bis auf der PROFIBUS-Seite das Telegramm vollständig empfangen wurde, sondern bereits nach Eintreffen von bis zu 44 Byte diese als AAL-SDU der AAL-Schicht übergeben. Gleiches gilt für jede weitere Zelle. Diese Eigenschaft, die etwa mit dem „cut through“ klassischer Brücken vergleichbar ist, birgt wertvolles Einsparungspotential. Die Wartezeit bis zum vollständigen Empfang des Telegramms vom PROFIBUS verlängert die Nachrichtenzyklen, an denen lange Telegramme beteiligt sind. Dieses Verfahren erwartet aber, daß der Jitter zwischen den Zellen eines Telegramms eine bestimmte Schwelle nicht überschreitet, so daß das kontinuierliche Aussenden des Telegramms, rekonstruiert aus den Zellinhalten, nicht unterbrochen werden muß. Die Schwelle wird durch die Datenrate des PROFIBUS bestimmt. Abbildung 37 zeigt den Transport von Telegrammen durch das ATM-Netz im Strom-Modus und Abbildung 38 gibt Algorithmen der Funktionsweise der Brücken im Strom-Modus an.

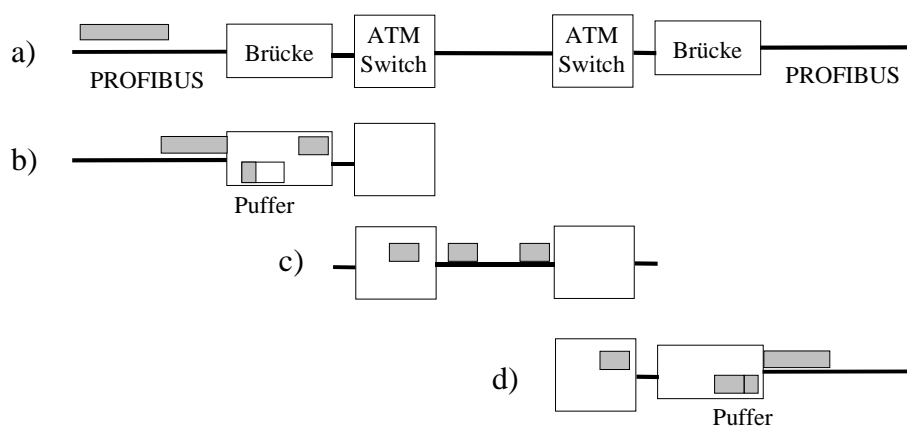


Abbildung 37: Zellenübertragung im Strom-Modus

Ein PROFIBUS Telegramm wird zunächst von einem an das Segment angeschlossenen PROFIBUS-Teilnehmer auf die Leitung gelegt (Abbildung 37 a). Die Brücke erkennt, ebenso wie alle anderen PROFIBUS-Teilnehmer, nach Verstreichen der Idle-Zeit am Signalwechsel auf der Leitung den Beginn eines Telegramms und beginnt mit dem Empfang der Telegrammzeichen. Diese werden in einen Puffer abgelegt (b). Paßt das Telegramm vollständig in den Puffer oder sind genügend Telegrammzeichen im Puffer, um den Nutzdatenteil einer Zelle füllen zu können (bei AAL 5 sind dies 44 Byte) wird der Pufferinhalt zusammen mit Steuerinformationen an die AAL-Schicht übergeben. Die Steuerinformationen sind Markierungen zur Signalisierung, daß das Telegramm bereits vollständig empfangen wurde (Abbildung 36) oder noch weitere Daten zu diesem Telegramm gehören. Auf die Mechanismen der AAL kann in dieser Übertragungsvariante nicht zurückgegriffen werden, da der AAL jeweils nur Daten im Umfang einer Zelle übergeben werden. Eine Segmentierung findet innerhalb der AAL nicht mehr statt. Daraufhin wird die Zelle unmittelbar ausgesendet. Signifi-

kant ist hier, daß nicht der vollständige Eingang eines mehr als 44 Byte langen Telegramms abgewartet wird, was eine Verkürzung der Übertragungsdauer bewirkt. Unter der Annahme, daß der PROFIBUS mit einer geringeren Datenrate arbeitet als das Äquivalent der am UNI festgelegten Zellenrate füllt sich der in b) dargestellte Puffer der Brücke langsamer als das Absenden der Zellen passiert. Dadurch folgen die Zellen nicht direkt aufeinander, wie in c) ersichtlich ist. Auf der Seite der empfangenden Brücke d) treffen die Zellen nach und nach ein. Auch hier wird zur Verkürzung der Übertragungsdauer nicht gewartet, bis alle Zellen, die zu einem Telegramm gehören, eingetroffen sind, sondern sofort nach Erhalt der ersten Zelle mit dem Aussenden des darin enthaltenen Teilstückes des Telegramms begonnen. Empfangsseitig verfügt die Brücke über einen Puffer d). Dieser sollte sich durch das schnellere Eintreffen der Zellen als das Aussenden auf der PROFIBUS-Leitung passieren kann füllen. Es muß sichergestellt werden, daß der Strom der auf dem PROFIBUS ausgesendeten Telegrammzeichen nicht abreißt. Dies kann dann vorkommen, wenn beispielsweise eine Zelle verloren ging oder nachfolgende Zellen aufgrund von Stausituationen im ATM-Netz nicht rechtzeitig eintreffen. Zellverluste können nicht kompensiert werden. Eine Möglichkeit zum Ausgleich der Schwankungen bei der Übertragungsverzögerung ist der Aufschub des Aussendens der ersten Telegrammzeichen nach dem Empfang der ersten Zelle um eine gewisse Zeit. Dies gilt für den Fall, daß das Telegramm in mehreren Zellen übertragen wurde.

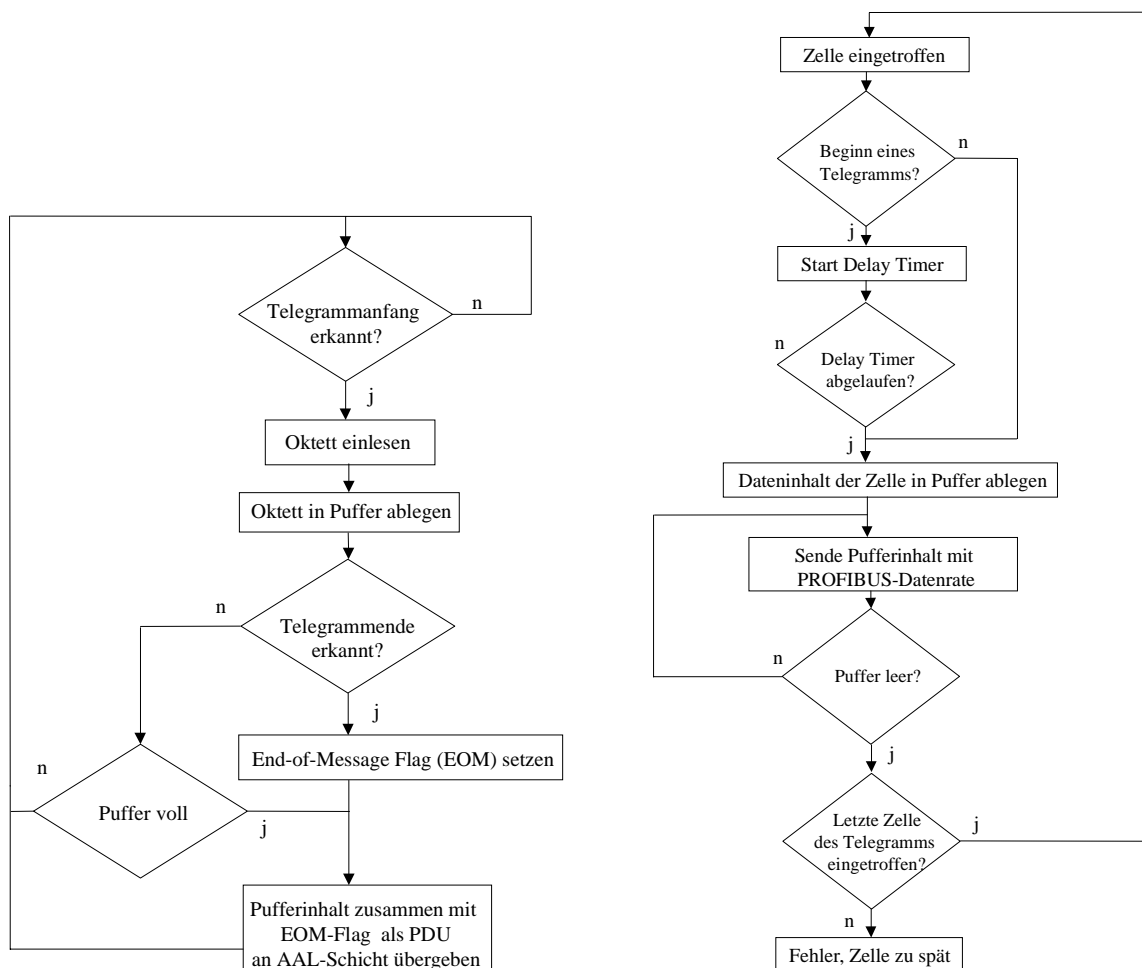


Abbildung 38: Arbeitsweise des Strom-Modus bei Empfang vom PROFIBUS (links) und Senden auf PROFIBUS (rechts)

Mit der Wahl des Strom-Modus wird die Ende-zu-Ende-Verzögerung bei Telegrammen, die in mehr als einer Zelle transportiert werden, gegenüber dem Block-Modus verringert. Dies wird hauptsächlich dadurch erreicht, daß die entfernte Brücke nicht warten muß, bis das komplette Telegramm eingetroffen ist, sondern bereits nach Erhalt der ersten Zelle mit dem Aus-senden des Telegramms auf dem Teilsegment beginnen kann.

Zusammenfassung

Die grundlegenden Eigenschaften von beiden im weiteren vorzustellenden Kopplungsmodellen wurden in diesem Kapitel diskutiert. Aus den Möglichkeiten der Verbindung von PROFIBUS mit ATM auf den verschiedenen Schichten wurde das Bridging in der FDL-Schicht als die geeignete Variante herausgestellt und den Funktionsumfang einer Brücke als Zwischensystem zur Kopplung umrissen. Darüber hinaus wurden die beiden Modellansätze zur Kopplung eingeführt. Aus einer Analyse des allgemeinen Kommunikationsverhaltens von PROFIBUSsen wurde auf deren Anforderungen an den Übertragungsdienst auf ATM-Verbindungen geschlossen und eine Reflexion auf die im Verkehrsvertrag für die Verbindung zu vereinbarenden Qualitätsparameter gegeben. Die Relevanz von Zellverlusten und Verzögerungen für das PROFIBUS-Systemverhalten und die damit verbundene Aufrechterhaltung der Voraussagbarkeit der Dauer von Nachrichtenzykluszeiten wurde dargestellt.

Spezielle, durch die Kopplung allgemein und die Verwendung von ATM hervorgerufene Problematiken, wie die Telegrammwiederholungen und die Umsetzungsmodi zwischen Telegrammen und Zellen standen im weiteren im Mittelpunkt der Diskussion.

4 Transparentes PROFIBUS-Bridging

4.1 Systembeschreibung

Die Idee hinter diesem Ansatz ist die Zuordnung der Feldgeräte zu einzelnen voneinander entfernten physischen Segmenten. Die PROFIBUS-Teilnehmer gehören aber weiter einem gemeinsamen Adreßraum an und alle aktiven Teilnehmer konkurrieren um ein Token, das ebenfalls über das Verbindungsnetz übertragen wird. Systemweit gelten dieselben PROFIBUS-Parameter. Die Verbindung der Segmente erfolgt für die Teilnehmer in allen angeschlossenen Segmenten vollständig transparent. Es findet kein Filtern von PROFIBUS-Telegrammen statt. Die Hauptaufgabe der Kopplung haben die Brücken auszuführen, welche eine Verbindung zum PROFIBUS und einen Anschluß an das ATM-Netz besitzen.

4.2 Funktion der Brücke

Nachfolgend soll die Funktionalität und das Verhalten eines Brückenelementes in Bezug auf die Integration in ein PROFIBUS-System untersucht und daraus Implikationen für das Design des Brückenelementes gewonnen werden. Zuerst wird die Analyse des zu erbringenden Verhaltens durchgeführt. Daraufhin werden mögliche Konsequenzen für den Betrieb des PROFIBUS diskutiert.

Entsprechend dem PROFIBUS-Standard hat jede Station jedes Telegramm zu empfangen, auch wenn ein Telegramm nicht an diese Station adressiert wurde. Die Gründe hierfür liegen in der Synchronisation des PROFIBUS. Für das Brückenelement ergeben sich daraus eine Reihe von Konsequenzen. Alle auftretenden Telegramme müssen die Brücke erreichen. Die Brücke muß ihrerseits alle Telegramme des angeschlossenen Segments, auch Token, in das ATM-Netz einspeisen und zu allen entfernten Segmenten übertragen. Die Brücke besitzt dabei keine eigene Adresse und ist damit aus PROFIBUS-Sicht weder aktiver noch passiver Teilnehmer. Fehlerüberwachungs- und Fehlerkorrekturmechanismen verbleiben bei den PROFIBUS-Einheiten. Für die Brücke muß die Möglichkeit bestehen, ungeachtet des Token-Passing-Mechanismus auf den Bus zugreifen zu können. Dennoch darf dies nicht willkürlich geschehen, sondern nur, wenn ein Aufruf- oder Quittungstelegramm bzw. das Token in den angeschlossenen Teil des Feldbusses eingebracht werden soll. Prinzipiell wird hierdurch die Konformität zum Standard nicht verletzt, da gesichert durch das Stop-and-Wait Prinzip des PROFIBUS ohnehin nur eine Station den Buszugriff besitzt und kein asynchrones Verhalten der gekoppelten Segmente untereinander auftreten kann. Dies muß und wird auch in der gekoppelten Variante gewährleistet sein.

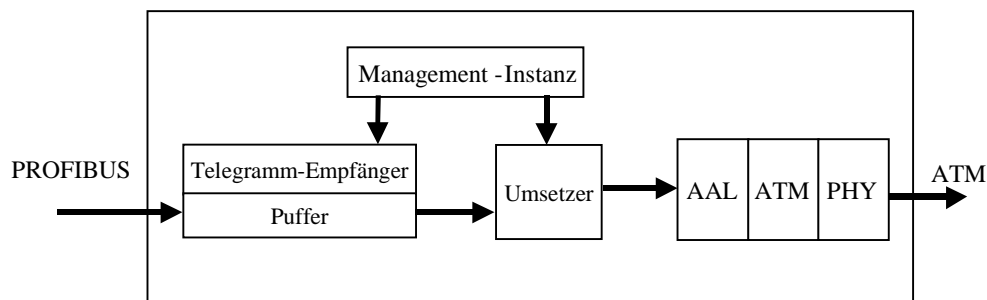


Abbildung 39: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Brücke (1)

Abbildung 39 und Abbildung 40 zeigen die modulare Struktur einer transparenten PROFIBUS-ATM-Brücke mit den jeweils beteiligten Instanzen bei der Umsetzung von Telegrammen in Zellen und umgekehrt. Die wesentlichen Komponenten sind das ATM-Interface und das PROFIBUS-Interface. Durch den Umsetzer werden die AAL-SDUs erzeugt (1) oder diese der Telegramm-Sendeinstanz übergeben (2). Über die Management-Komponente erfolgt die Wahl zwischen Block- oder Strom-Modus sowie die Einstellung der dabei relevanten Parameter.

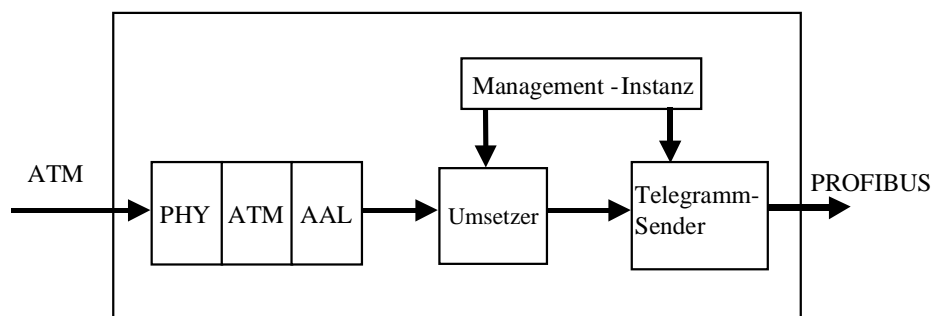


Abbildung 40: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Brücke (2)

Den Protokollautomaten zur Funktion der transparenten PROFIBUS-ATM-Brücke, die im Strom-Modus agiert, zeigt Abbildung 41. Zentraler Zustand ist die Empfangsbereitschaft auf beiden Ports. Trifft ein Telegramm oder Token auf dem PROFIBUS Interface ein, wird entsprechend dem Strom-Modus-Verfahren eine AAL-SDU mit den Markierungen (BOM, COM, EOM, SSM und Sequenznummer) aufgebaut und der AAL-Schicht zur Aussendung übergeben.

Von der AAL-Schicht angebotene SDUs werden einer Auswertung zur Feststellung von Zellverlusten unterzogen. Endet die Auswertung mit einem positiven Ergebnis, wird das Telegrammfragment gesendet und in den Zustand der Empfangsbereitschaft zurückgekehrt. Im Zustand -Telegramm senden- wird die Idle-Time-Funktion ausgeführt, die sicherstellt, daß zwischen der Aussendung von zwei verschiedenen Telegrammen mindestens die Idle-Time verstreicht.

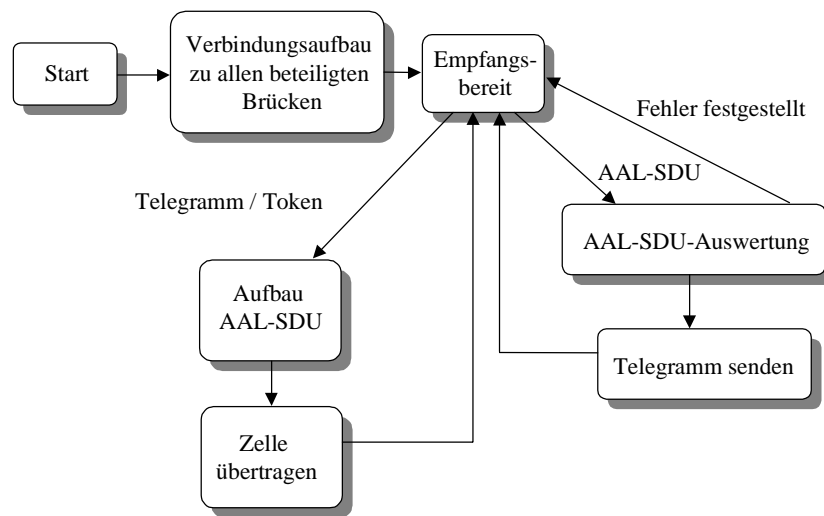


Abbildung 41: Protokollautomat der transparenten Brücke

Basierend auf einer konfigurierbaren Verbindungstabelle werden in der Initialisierungsphase die projektierten ATM-Verbindungen zwischen den beteiligten Brücken aufgebaut. Der Automatenteil im Zusammenhang mit dem dynamischen Verbindungsaufbau, -abbau und der Verbindungsüberwachung ist in Abbildung 42 dargestellt. Bestehende Verbindungen werden durch periodische Lebenszeichen überwacht. Eintragungen über den Status einer Verbindung in der Verbindungstabelle unterliegen einer Alterungsfunktion. Ein abgelaufener Eintrag einer Verbindung oder der Wunsch des lokalen Segmentes, sich vom gemeinsamen System zu lösen, setzen Verbindungsabbau-Prozeduren in Gang. Eintreffende Lebenszeichen frischen den Alterungseintrag in der Tabelle für die jeweilige Verbindung auf. Verbindungsaufbauwünsche von entfernten Brücken lösen entsprechende ATM-Verbindungsaufbau-Mechanismen aus. Die Brücke selbst sendet periodisch Lebenszeichen an alle anderen beteiligten Brücken.

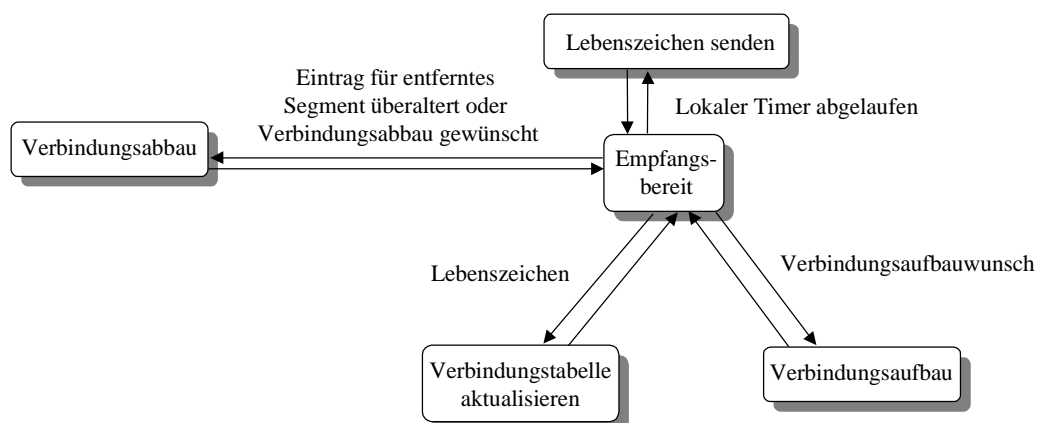


Abbildung 42: Teilautomat zur Verbindungsverwaltung

Die vorgeschlagene Kopplungsvariante birgt einige Implikationen für das Gesamtverhalten eines PROFIBUS-Systems, besonders im Hinblick auf das Zeitverhalten. Auf besondere Systemzustände in diesem Zusammenhang soll nun das Augenmerk gelenkt werden.

4.3 Auswirkungen der Kopplung auf das Echtzeitverhalten und Verhalten bei Fehlern

Ein Beispielszenario soll der Veranschaulichung dienen. Ein verteiltes System, bestehend aus drei Segmenten ist transparent durch ein ATM-Netz verbunden. Technisch gesehen wurden zwischen den Brücken jeweils Punkt-zu-Mehrpunkt-ATM-Verbindungen (Virtuelle Kanäle) aufgebaut. Es ist durchaus wünschenswert, das verbindende ATM-Netz zu kennen, d.h. die Anzahl der Switches, deren Puffergrößen und die gesamte Leitungslänge sowie die weiteren Datenströme, die eventuell parallel in das Netz eingebracht werden. Im optimalen Falle befindet sich das ATM-Netz in der Verwaltung des Betreibers der PROFIBUS-Anlage, der Kenntnis über diese Fakten hat. Hierdurch sind Überlastsituationen und damit einhergehende Zellverluste eingrenzbare. In allen anderen Fällen ist der Weg, den die Zellen durch das ATM-Netz nehmen, schwer zu bestimmen und damit zugleich ihre Verzögerung und der Einfluß von Interferenzdatenströmen, die dieselben Verbindungen und Schaltelemente passieren.

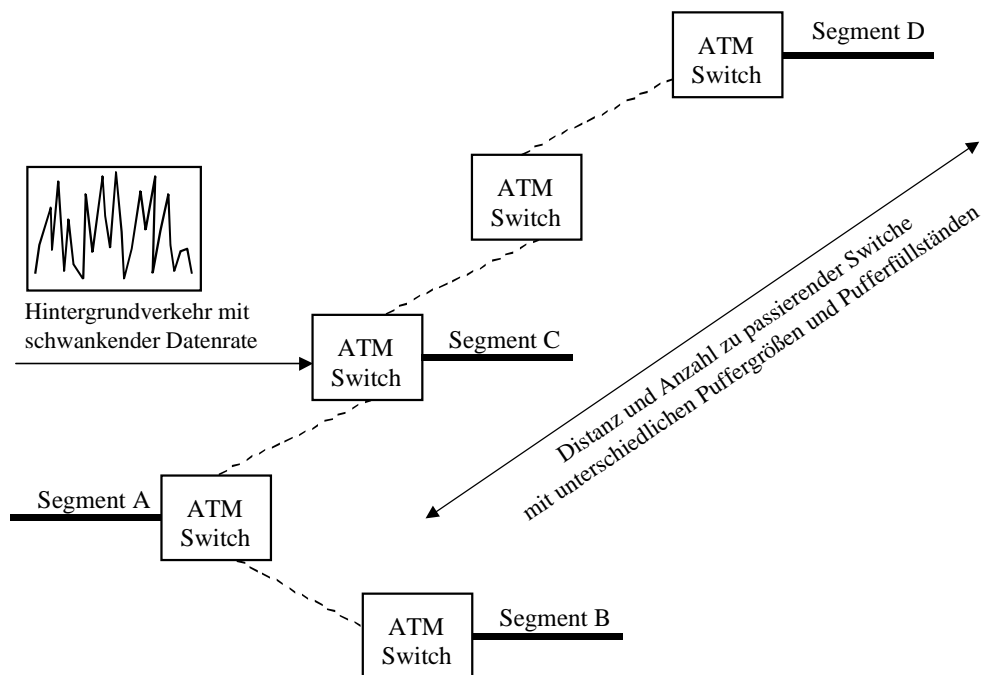


Abbildung 43: Hintergrundlast und verschiedene Distanzen zwischen den Segmenten

Unabhängig von der Anzahl der Segmente greifen die Sicherungsmechanismen des PROFIBUS effektiv, wenn Fehler innerhalb des ATM-Netzes auftraten. Die Fehlerüberwachungs- und Fehlerbehebungsverfahren werden nicht durch die Brücken vorgenommen. Geht das Telegramm auf der Verbindung verloren, die zu dem Segment besteht, in dem sich die angesprochene Station befindet, läuft der Slot-Timer ab und der Aufruf wird wiederholt. Erreicht das Telegramm zwar die angesprochene Station, aber nicht alle anderen Stationen, so ist dies von nachrangiger Bedeutung, weil die anderen Stationen ohnehin nicht reagieren,

weil sie nicht adressiert sind. Erst wenn ein Segment über längere Zeit vom Gesamtgeschehen abgeschnitten ist (Time-Out-Timer), so tritt eine Ausnahmesituation auf. Derartiges passiert aber nur bei einer Leitungsunterbrechung nicht bei temporärer Überlast im ATM-Netz. Anders ist die Situation bei Broadcast-Nachrichten. Hier führt der Verlust von Zellen auf einer ATM-Verbindung tatsächlich zu Inkonsistenzen möglicherweise gleich bei mehreren Stationen. Dieses Problem ist aber bei allen Systemen, die unzuverlässiges Multicasting oder Broadcasts verwenden, anzutreffen. Ansätze aus dem Bereich der Internet-Protokolle, die das Ziel zuverlässiger Gruppenkommunikation verfolgen, sind in [WiZi99] beschrieben.

4.3.1 Token-Verwaltung

Im Rahmen der Token-Weitergabe an seinen Nachfolger erwartet der Sender innerhalb der Slot-Zeit den Empfang eines gültigen Telegramms. Wird keine Busaktivität wahrgenommen, so wiederholt der Sender die Tokenweitergabe noch einmal. Wird auch hiernach keine Busaktivität wahrgenommen, so wird noch ein letztes Mal wiederholt. Erst wenn dies auch fehlschlägt, so wird das Token an den übernächsten Teilnehmer in der LAS weitergegeben. Dieser Mechanismus wird stark von der Qualität der ATM-Verbindungen beeinflusst. Die vorgesehene nur zweimalige Wiederholung des Tokens bei Fehlern kann bei schlechten Verbindungen zum Zusammenbruch des Systems führen. Inkonsistenzen durch Bitfehler im Datenteil einer ATM-Zelle werden durch das Prüfbyte des PROFIBUS-Telegramms mit Hd=4 abgefangen.

Das Zufügen und Entfernen von Teilnehmern bleibt bis auf die Konsequenzen aus möglichen Telegrammverlusten unbeeinflusst.

Nimmt eine aktive Station über einen längeren Zeitraum, Time-out Time, keine Busaktivität wahr, so nimmt sie an, daß das Token verloren ging und strebt die Neuinitialisierung des Token-Rings an. Diese Situation kann eintreten, wenn während innerhalb der Time-out Zeitspanne kein Telegramm das Segment erreicht, also eine ATM-Verbindung über längere Zeit sehr stark gestört ist.

4.3.2 Echtzeitverhalten

Die grundlegende Problematik, hervorgerufen durch ATM, liegt in der zusätzlichen Verzögerung und den möglichen Fehler in Form von Zellverlusten. In erster Linie ist offensichtlich zu berücksichtigen, daß sich mit der Zwischenschaltung eines ATM-Netzes alle Nachrichtenzyklen sowie Tokenzyklen verlängern werden. Die zusätzlich auftretende Verzögerung ist zudem nicht statisch. Es wirken sich die bereits in Kapitel 3 diskutierten systembedingten Verzögerungen auf die Gesamtdauer aus, die eine Zelle beim Durchqueren eines ATM-Netzes benötigt. Die Auswirkungen der Warteschlangenverzögerung in ATM-Switchen wird in einem folgenden Abschnitt anhand von Simulationsergebnissen hervorgehoben. Ebenso diskutiert werden die Implikationen von Zellverlusten auf der ATM-Verbindung. Zellverluste werden aus verschiedenen Gründen provoziert. Häufigste Ursache können jedoch temporäre Überlastsituationen innerhalb der Switches sein. Verfälschungen von Zellen auf dem Übertragungsmedium sind bei Einsatz von hochwertigen Leitungen die seltenere Ursache für Zellverluste.

4.3.3 PROFIBUS Systemzeiten

Unweigerlich führt die Kopplung von PROFIBUS-Segmenten mittels ATM zu Rückwirkungen auf die Parametrierung einer PROFIBUS-Anlage. In welcher Weise die Kopplung mit ATM die Systemzeiten von PROFIBUS beeinflusst, wird im folgenden anhand relevanter

PROFIBUS Systemzeiten erläutert. Die diskutierten Aspekte werden später durch Simulationsergebnisse unterstrichen.

Mehrere Bestandteile bilden die zusätzliche Verzögerung eines PROFIBUS-Telegramms auf dem Weg vom Sender zum Empfänger. Zur Darstellung dieser werden zwei neue Parameter eingeführt.

- T_{SDB} - Station Delay des Brückenelements: Dieser Parameter beinhaltet sämtliche Zeit für die Verarbeitung innerhalb der Brücke. Unterschieden werden muß anhand der Länge eines PROFIBUS-Telegramms, ob es noch in der Nutzinhalt einer Zelle paßt oder ob mehr als eine Zelle notwendig werden, um das Telegramm vollständig zu übertragen. Die Verzögerung innerhalb der Brücke wird in beiden Richtungen PROFIBUS-ATM und ATM-PROFIBUS wirksam.
- T_{TDA} - Transfer Delay ATM: Das Transfer Delay ATM umfaßt die Sendezeit aller zu einem Telegramm gehörenden Zellen, die Switch-Durchschaltzeiten und die Gesamtaufenthaltsdauer innerhalb der Warteschlangen der passierten Switches.

Der weitaus größte Teil des Datenaustausches findet in Zyklen in der Form von bestätigten Diensten statt. Auf den Tokentransfer entfällt von der Anzahl der Übertragungen her gesehen ein Hauptteil der auf dem Bus zu beobachtenden Telegramme. Aus diesen Gründen zielt die folgende Analyse auf die Auswirkungen der Übertragung durch das ATM-Netz auf die Dauer der genannten Vorgänge ab.

Grundsätzlich ist von folgenden Situationen auszugehen. Einerseits können sich sowohl der Aufrufer (Requester) als auch die antwortende Station (Responder) in demselben Segment befinden. Analog ist hierzu die Weitergabe des Tokens zu betrachten. Für diesen Fall müßten Aufruf und Antworttelegramm nicht durch das ATM-Netz übertragen werden. Dem steht jedoch der PROFIBUS-Standard entgegen. Hier heißt es, daß jedes Telegramm von allen angeschlossenen Stationen empfangen werden muß. Für die weitere Diskussion ist diesbezüglich von der Konformität zum Standard auszugehen. Auf dem entfernten Segment muß das Telegramm erneut komplett ausgesendet werden. Auf der anderen Seite ist jeweils der Fall zu betrachten, bei dem sich Aufrufer und die antwortende Station in verschiedenen Segmenten befinden. Auf beide Situationen wird im folgenden anhand der Übertragung im Block-Modus getrennt eingegangen. Für die zweite Situation gilt, daß in jeden Zyklus noch einmal die Sendedauer des Aufrufs im entfernten und der Antwort im lokalen Segment mit in die Berechnungen einfließen muß.

a) Token-Zykluszeit

Im reinen Feldbussystem ergibt sich die Token-Zykluszeit T_{TC} aus:

$$(1) \quad T_{TC} = T_{TF} + T_{TD} + T_{ID}$$

TC : Grundlast in einem System mit mehreren aktiven Teilnehmern

Gesamte Grundlast je Tokenumlauf = $n_a * T_{TC}$

n_a : Anzahl aktiver Teilnehmer

TF: Telegrammdauer

TD: Transmission Delay (Laufzeit)

ID : Idle Time (Protokollbearbeitungszeit + Synchronisationszeit)

Für das gekoppelte System ergeben sich theoretisch zwei Token-Zykluszeiten:

a) Wenn der adressierte Master im lokalen Segment ist:

$$T_{TC} = T_{TF} + T_{TD} + T_{ID}$$

Wenn der adressierte Master in einem entfernten Segment ist:

$$b) T_{TC} = T_{TF} + T_{TD} + T_{ID} + 2 * T_{SDB} + T_{TDA} + T_{TF} + T_{TD}$$

Um die Synchronität zu gewährleisten, werden die Systemzeiten stets so abgestimmt, daß die Zykluszeit für das am weitesten entfernte Segment gültig ist. Hinter dem Begriff Entfernung steht in diesem Zusammenhang einerseits die räumliche Entfernung, andererseits wird der Begriff aber auch durch die maximale Übertragungsdauer zwischen jeweils zwei Teilnehmern geprägt.

Damit ergibt sich die Zykluszeit für die in diesem Sinne entferntesten aktiven Stationen aus:

$$(2) \quad T_{TC} = T_{TF} + T_{TD} + T_{ID} + 2 * T_{SDB} + T_{TDA} + T_{TF}$$

Nach dieser Zeit hat aber der Master, der das Token weitergeleitet hat, noch keine Kenntnis davon, ob der adressierte Master tatsächlich das Token adoptiert hat. Gewißheit darüber hat der Sender erst, wenn ein Aufruftelegramm oder das Token, ausgesendet vom adressierten Master, auf dem Bus erscheint. Ist der adressierte Master funktionsunfähig oder trat ein Übertragungsfehler auf, greifen die Mechanismen der Übertragungswiederholung nach abgelaufener Slot-Zeit.

b) Nachrichten-Zykluszeit

Im konventionellen PROFIBUS ergibt sich die Nachrichten-Zykluszeit T_{MC} aus:

$$(3) \quad T_{MC} = T_{S/R} + T_{SDR} + T_{A/R} + T_{ID} + 2 * T_{TD}$$

$T_{S/R}$: Sendezeit des Aufruftelegramms

T_{SDR} : Station Delay Responder

$T_{A/R}$: Sendezeit des Antworttelegramms

T_{ID} : Idle-Time

In einem PROFIBUS gemäß dem vorgeschlagenen Ansatz muß das ATM-Netz zweimal durchquert werden, wenn Requester und Responder sich nicht in demselben Segment befinden.

$$(4) \quad T_{MC} = T_{S/R} + T_{SDR} + T_{A/R} + T_{ID} + 4 * T_{TD} + 4 * T_{SDB} + 2 * T_{TDA} + T_{S/R} + T_{A/R}$$

Hierbei wird abstrahierend angenommen, daß das Transfer-Delay ATM in beiden Richtungen gleich ist. Üblicherweise unterscheiden sich aber Aufruftelegramm und Antworttelegramm in der Länge.

c) Systemreaktionszeit

Die Systemreaktionszeit in einem PROFIBUS mit einem Master setzt sich aus der Nachrichtenzykluszeit multipliziert mit der Anzahl passiver Teilnehmer zusammen.

$$(5) \quad T_{SR} = n_p * T_{MC} + m_p * RET \cdot T_{MC}$$

n_p : Anzahl passiver Teilnehmer

m_p : Anzahl Nachrichten-Wiederholzyklen

In einem System mit mehreren Mastern entspricht die Systemreaktionszeit der Token-Soll-Umlaufzeit. $T_{SR} = T_{TR}$

Die Systemreaktionszeit verlängert sich um die in T_{MC} auftretenden Verzögerungen innerhalb des Brückenelementes und des Transfer Delay innerhalb des ATM-Netzes.

Token-Soll-Umlaufzeit

$$(6) \quad \min T_{TR} = n_a * (T_{TC} + \text{high } T_{MC}) + k * \text{low } T_{MC} + m_t * RET \cdot T_{MC}$$

n_a : Anzahl aktiver Teilnehmer

k : voraussichtliche Anzahl niederpriorer Nachrichtenzyklen je Tokenumlauf

T_{TC} : Token- Zykluszeit

T_{MC} : Nachrichten-Zykluszeit

Die Token-Soll-Umlaufzeit verlängert sich durch die in T_{TC} und T_{MC} enthaltenen Verzögerungen.

d) Überwachungszeiten

Slot-Zeit

Der Slot-Timer bestimmt, wie lange nach dem Aussenden des letzten Bits eines Telegramms auf die Reaktion des adressierten Teilnehmers gewartet wird. Abhängig von der Situation wartet der Sender entweder auf ein Antworttelegramm oder auf eine Aussendung des Masters, dem er das Token geschickt hat. Tritt in beiden Fällen nicht das Erwartete ein, so wird nach Ablauf der Slot-Zeit die Übertragung wiederholt. Ein Spezialfall dessen ist der Test zur GAP-Aktualisierung. Auch hier wird der Slot-Timer genutzt. Ist nach Ablauf der Slot-Zeit keine Reaktion des adressierten Teilnehmers vernehmbar, wird entweder der nächste zu testende Teilnehmer aufgerufen oder mit der Tokenweitergabe fortgefahren. Die Slot-Zeit ist direkt mit jedem Nachrichtenzyklus assoziiert. Sie ist ein Systemparameter, dessen Einstellung von der Kopplung betroffen ist. Die Slot-Zeit muß so groß gewählt werden, daß bei normaler Funktion eine Antwort des entferntesten Teilnehmers rechtzeitig beim Aufrufer eintreffen kann. Anders ausgedrückt richtet sich die Slot-Zeit nach dem längsten Nachrichtenzyklus innerhalb des gesamten PROFIBUS.

$$(7) \quad T_{SL} = 2 * T_{TD} + \max T_{SDR} + 11 \text{ Bit} + T_{SM} + 4 * T_{SDB} + 2 * T_{TDA} + T_{S/R} + T_{A/R}$$

In die Berechnung der Slot-Zeit fließt zusätzlich die Sendezeit des Aufruftelegramms und die Sendezeit des Antworttelegramms im entfernten Segment ein. In Bezug auf das Antworttele-

gramm muß lediglich das erste Telegrammzeichen vollständig auf dem Bus ausgesendet worden sein (11 Bit).

Auf die Einstellung der Slot-Time ist größte Sorgfalt zu verwenden, weil diese für das Auslösen von Wiederholmechanismen herangezogen wird. Im Extremfall kann eine Deadlock-Situation entstehen.

Aus-Zeit

$$(8) \quad T_{TO} = 6 * T_{SL} + 2 * n * T_{SL}$$

In die Auszeit fließt die bereits in der Slot-Zeit enthaltene Verzögerung ein.

e) unbestätigter Dienst

Bei einem unbestätigten Dienst, einem Aufruftelegramm, das nicht beantwortet oder quittiert wird, wartet der Requester die Idle-Zeit bis er entweder das Token weiterreicht oder einen weiteren Nachrichtenzyklus beginnt. Auf diesen Übertragungsfall wirkt sich die Kopplung nicht aus.

4.4 Simulationen zum transparenten PROFIBUS-Bridging

4.4.1 Simulationswerkzeug BONEs Designer

Das im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Simulationswerkzeug BONEs (Block Oriented Network Simulator) Designer in der Version 4.0 ist ein Teil der Produktreihe der Firma Cadence Design Systems. Zur Simulation des dynamischen Verhaltens von PROFIBUS-Systemen wurden eine Reihe von Modulen aus dem PROFIBUS-Umfeld, dem ATM-Bereich und Brücken als Koppelemente verschiedenartiger Ausprägung entwickelt. Als Module werden die Teilkomponenten eines zu simulierenden Systems bezeichnet.

Beim Werkzeug BONEs Designer handelt es sich um ein Softwarepaket für die ereignisgesteuerte Simulation von Rechnernetzen. Grundlage des zu simulierenden Systems sind Datenstrukturen und Verarbeitungseinheiten dafür. Im der Semantik von BONEs Designer werden diese Verarbeitungseinheiten als Module bezeichnet. Das System unterstützt die Ausführung von Simulationen und bietet Möglichkeiten der nachträglichen Analyse. BONEs Designer verfügt bereits von sich aus über eine Reihe von Bibliotheken für verschiedene Netzwerktypen und deren Protokolle.

Zu dem Simulationswerkzeug gehört eine Bibliothek mit einigen ATM-Modulen. Dazu gehören die AAL-Schicht 5 mit dem CS und SAR Teilschichten, aber auch ein Modul eines 4-Port ATM-Switches, das für die Simulationen auf 16 Ports erweitert wurde. Auf Module mit der Funktionalität des PROFIBUS konnte nicht zurückgegriffen werden. Solche wurden erst im Zuge der Arbeit entwickelt.

Die übliche Vorgehensweise beim Entwurf eines Simulationsmodells mit BONEs Designer umfaßt folgende vier Schritte. Zuerst werden Datenstrukturen erstellt, die stellvertretend für Pakete bzw. Rahmen fungieren. Auf der Basis von hierarchisch organisierten Blockdiagrammen werden dann die zu simulierenden Szenarien modelliert. Die Blöcke umfassen solche einfachster Funktion wie Zähler oder Speicher bis hin zu komplexeren Komponenten wie Warteschlangen und Generatoren von Zufallszahlen. Anschließend an die Modellierung werden die Simulationen entweder interaktiv oder automatisch durchgeführt. Für die Phase der

Auswertung bietet das Werkzeug auch Funktionen zur graphischen Darstellung und optischen Aufbereitung.

Die genannten Teilkomponenten sind in der folgenden Abbildung 44 dargestellt und zueinander in Beziehung gesetzt. Eine detaillierte Beschreibung des Simulationswerkzeuges liefert die Programmdokumentation [Cade96a,Cade96b].

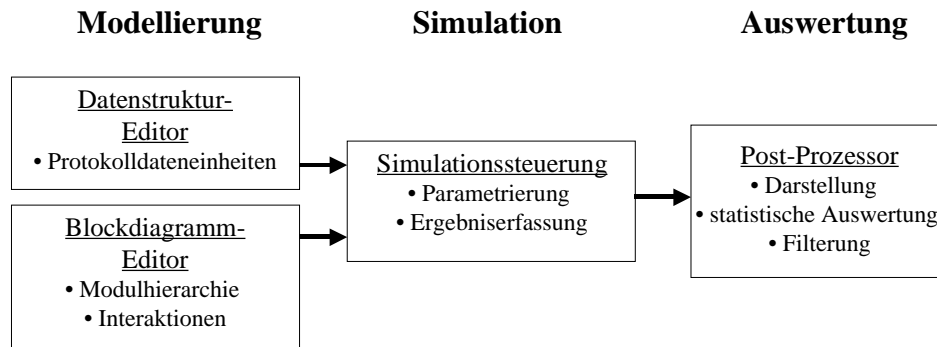


Abbildung 44: Teilkomponenten von BONEs Designer und deren Verwendung

Editor für Datenstrukturen

Zur Modellierung von Protokolldateneinheiten und zur Definition von Schnittstellen zum Austausch von Daten zwischen den Modulen werden Datenstrukturen in diesem Editor erstellt und in eine Baumstruktur eingearbeitet. Für die angestellten Simulationen wurde dies für die PROFIBUS-Telegrammformate durchgeführt. Die vorhandenen Strukturen für AAL-Dateneinheiten und ATM-Zellen konnten ohne Adaption verwendet werden.

Blockdiagramm-Editor

Hierarchisch organisierte Module werden mit Hilfe des Blockdiagramm-Editors erstellt. Ausgehend von zahlreichen Basismodulen werden komplexe Module durch Kombination und schnittstellengerechtes Verbinden erstellt. Zur Wahrung der Übersichtlichkeit ist die hierarchische Organisation sehr hilfreich. Die Abbildung 46 zeigt eine Ansicht eines Moduls der höchsten Abstraktionsebene. Zum leichteren Verständnis trägt die Wahl von sinnfälligen Darstellungen (Icons) für einzelne Module bei.

Bibliotheken

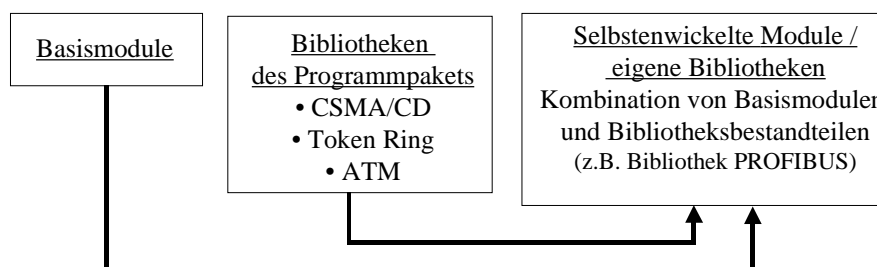


Abbildung 45: Zusammenwirken von Modulen und Bibliotheken bei BONEs Designer

Simulationsfunktionen

Simulationsabläufe werden durch den Simulationsverwalter angestoßen und überwacht. Im automatischen Modus werden die Simulationsiterationen der Reihe nach abgearbeitet. Es besteht aber auch die Möglichkeit, komplexere Simulationsläufe auf mehreren Rechnern zu starten. In der interaktiven Arbeitsweise können Simulationen schrittweise durchlaufen werden. Dieser Modus gestattet die Verfolgung von Simulationsparametern und Zuständen und vereinfacht gleichzeitig die Fehlersuche. Darüber hinaus erleichtert dieser Modus das Verständnis komplexer Protokollabläufe.

An beliebigen Stellen im Simulationsszenario können Module zur Erfassung von Zuständen und Werten (Probes) angeordnet werden. Diese liefern das Basismaterial für anschließende Auswertungen.

Auswertungsfunktionen

Vorliegendes Material der Erfassungsmodule kann abgespeichert und bereits mit Hilfe des Werkzeuges selbst einer ersten Auswertung unterzogen werden. Die Auswertungen können auch zeitlich unabhängig von den Simulationen vorgenommen werden.

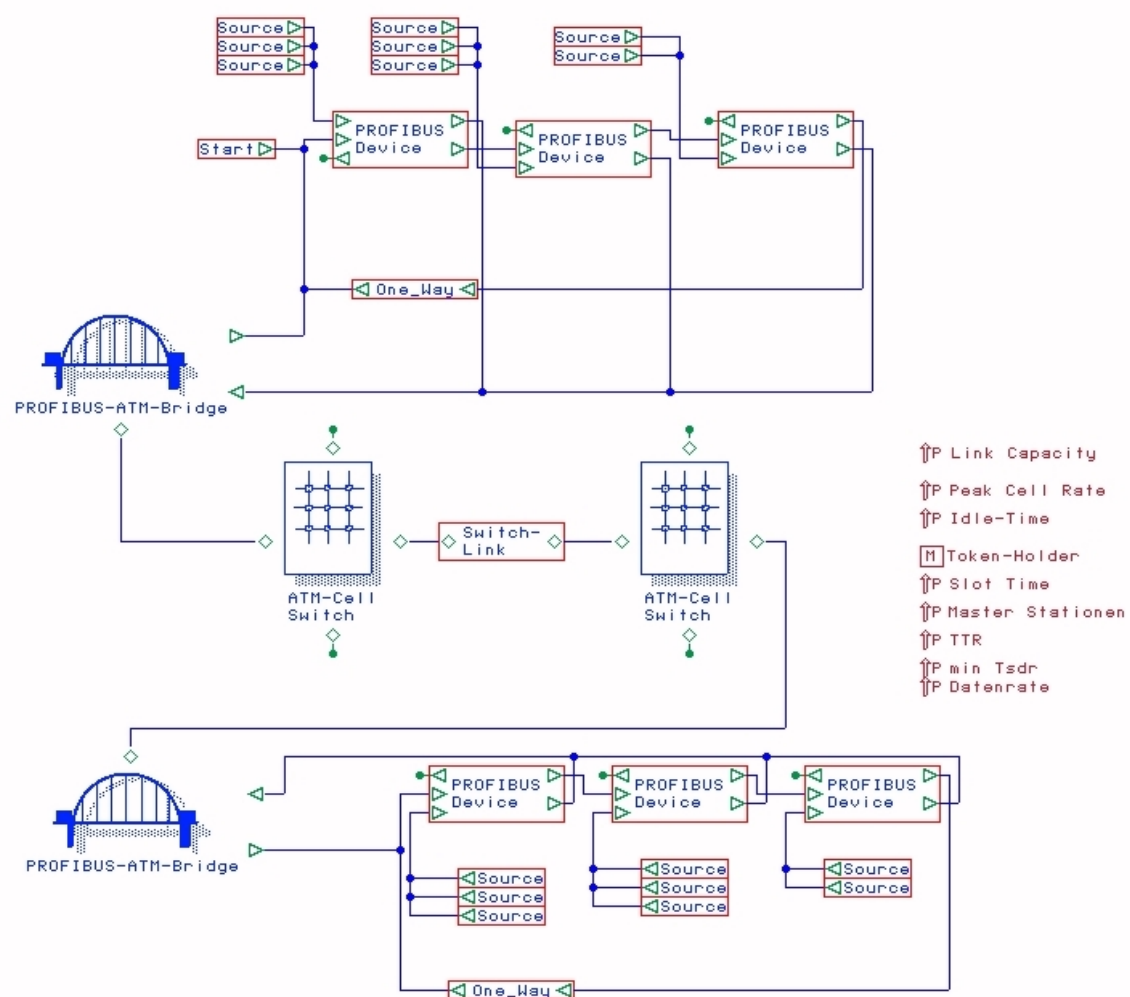


Abbildung 46: Blockdiagramm eines Simulationsszenarios

4.4.2 Beschreibung des verwendeten Modells

Basierend auf dem PROFIBUS-Standard wurden mit dem vorgestellten Simulations-Werkzeug Designer Module entwickelt. Hauptsächlich wurde die Funktionalität der Schicht 2 einer PROFIBUS-Komponente implementiert. Zur Anwendungsschicht hin stellt ein solches Modul eine Schnittstelle bereit, auf der es Kommunikationsanforderungen entgegennimmt und Antworten abliefert. Diese Module können als Master oder Slave eingesetzt werden und besitzen die für PROFIBUS typischen Möglichkeiten der Parametereinstellung. Zur Modellierung der Abstände zwischen Stationen existieren Link-Module, die für die jeweiligen Ausbreitungsverzögerungen sorgen. Mit den genannten Komponenten kann ein beliebiges PROFIBUS-System zusammengestellt werden. Nicht implementiert ist die GAP-Funktion, statt dessen werden die Stationsadressen aufsteigend vergeben.

Zur Nachbildung der Kommunikationsanforderungen aus Schicht 7 existieren Module als Lastgeneratoren für beliebige Telegramme. Ferner wurden mehrere Interworking-Units, welche die Funktionalität der Brücken nachbilden, implementiert. Auf der Seite zu ATM fungieren die Brücken als ATM-Endgerät. Verbindungsaufbau und -abbau der virtuellen Kanäle ist nicht implementiert, da davon ausgegangen werden kann, daß die VCs nur einmal aufgebaut werden und dann im normalen Betrieb nicht abgebaut werden. Dies ist ohnehin nicht sinnvoll, da ein solcher Verbindungsaufbau mehrere hundert Millisekunden in Anspruch nehmen kann. Auch Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen werden gegebenenfalls als vollständig eingerichtet vorausgesetzt. Ein Modell eines ATM Switch mit 16 Ports wurde aus einem vorhandenen Modul mit vier Ports geschaffen. Switches können untereinander zusammengeschaltet werden und bilden dann ein komplexeres ATM-Netzwerk.

4.4.3 Basissystem zur Simulation

Zur Untersuchung des PROFIBUS-Systemverhaltens unter definierten Lastsituationen bzw. unter extremen Bedingungen und zur Verifizierung des vorgestellten Ansatzes zur transparenten Kopplung fanden umfangreiche Simulationen statt. Die Szenarien, auf deren Basis die Simulationen durchgeführt wurden, sind Gegenstand der folgenden Darstellungen. Abbildung 47 zeigt ein einfaches PROFIBUS-System bestehend aus zwei Teilsegmenten, die über ATM verbunden sind, mit insgesamt sechs Master. Die zu überwindende Entfernung beträgt 10 Kilometer und wird durch das ATM-Netz, welches aus zwei Switches gebildet wird, getragen. Die Ausdehnung des Netzes trägt den potentiellen Anwendungsfällen der PROFIBUS-ATM-Kopplung Rechnung und reflektiert im speziellen auf das in der Einführung erwähnte Beispiel aus der Verkehrstechnik.

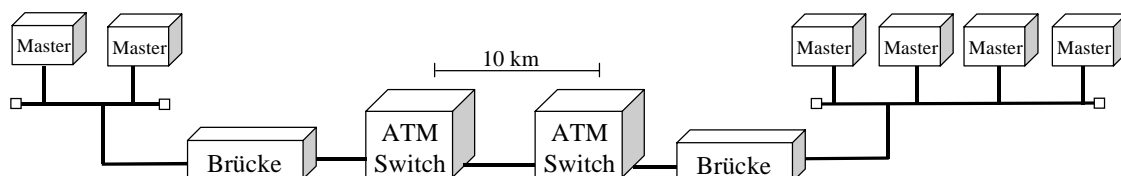


Abbildung 47: Basissystem zur Simulation

Alle Master tauschen das Token untereinander aus, so daß eine Grundlast im System vorhanden ist und auch das Token über das ATM-Netz übertragen wird.

Die Brücken besitzen die für das Modell der transparenten Kopplung beschriebene Funktionalität. Zur Bedeutung der einzelnen Parameter des PROFIBUS und ihrer Herleitung sei auf

das Grundlagenkapitel verwiesen. Die gewählten Parameter, die Eingang in die Simulation fanden, sind jeweils bei der Erläuterung der Simulationen aufgeführt.

Das Switch-Transit-Delay, das mit $25\ \mu\text{s}$ festgelegt ist, und das Bridge Delay mit einem Wert von $100\ \mu\text{s}$ fließen als nicht volatile Parameter in die Simulationsumgebung ein. Beide sind an Werte für existierende Komponenten angelehnt, die Datenblättern verschiedener Hersteller entnommen wurden und deshalb als realitätsnah einzuordnen.

4.4.4 Auswirkungen von Zellverlusten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Simulationen diskutiert, deren Zweck es war, die Auswirkungen von Zellverlusten auf den Betrieb des PROFIBUS-Basisystems zu studieren und daraus Erkenntnisse über die zu erbringende Dienstqualität auf den ATM-Verbindungen abzuleiten.

Auf der Grundlage des Basissystems von Abbildung 47 wird ein PROFIBUS-System abgebildet, das aus zwei Masterstationen besteht. Jeweils ein Master befindet sich auf einer Seite der ATM-Verbindung. Die Verbindungslänge beträgt 10 km. Ein Master fordert zyklisch im Abstand von 20 ms Daten von dem anderen Master an. Der andere Master initiiert keine Nachrichtenzyklen. Beide Master tauschen das Token aus.

Die Simulationsszenarien werden weiter durch Ausprägungen der folgenden Parameter bestimmt. Die Länge des Anforderungstelegramms insgesamt beträgt 250 Byte. Das Antworttelegramm ist insgesamt 10 Byte lang. Der PROFIBUS verwendet eine Datenrate von 500 Kbit/s. Als Slot-Zeit wurden 3 ms eingestellt. Die in diesem Szenario wenig relevante Token-Soll-Umlaufzeit beträgt 100 ms, $\text{min}T_{\text{SDR}}$ wurde mit $100\ \mu\text{s}$ und $\text{max}T_{\text{SDR}}$ wurde mit $200\ \mu\text{s}$ eingestellt. Die Simulationszeit betrug 60 Sekunden. Die Verbindung zwischen den beiden ATM-Switchen hatte eine Kapazität von 155 Mbit/s.

In Abbildung 48 sind die Reaktionszeiten der einzelnen Telegramme dargestellt. Die Reaktionszeiten, auch die auf den folgenden Abbildungen, umfassen den Zeitraum von der Auslösung des Request in der Schicht 7 bis zum Eintreffen der zugehörigen Response in der Schicht 7 des Requester. Die Schwankung zwischen den einzelnen Werten ergibt sich daraus, daß das Token zwischen den Mastern alterniert, wenn keine Kommunikationsanforderungen vorliegen. Daher kann es sein, daß eine eintreffende Anforderung nicht sofort ausgesendet werden kann.

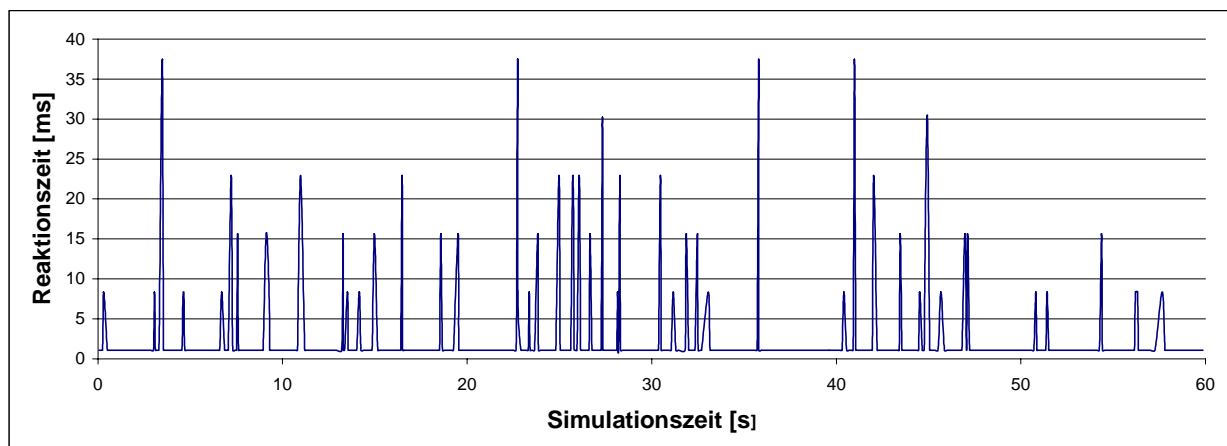


Abbildung 48: Reaktionszeit bei einer Zellverlustrate von 10^{-1}

Die Frequenz der Anforderungen ist aber so eingestellt, daß sich im fehlerfreien Falle nur maximal eine Anforderung in der Warteschlange aufhält. Um nur den Einfluß von Zellverlusten auf der ATM-Verbindung zu ermitteln, wurde kein Hintergrundverkehr hinzugefügt. In diesem System wird die Ausbreitungsverzögerung der Signale sowie die Durchschaltzeit in den Brücken und den Switches simuliert. Die ATM-Verbindung wurde mit unterschiedlichen Fehlerraten abgebildet.

Abbildung 48 zeigt Spitzen in der Reaktionszeit von bis zu 37 ms bei einer Zellverlustrate von 10^{-1} . Das Zustandekommen dieser teilweise sehr langen Reaktionszeiten ist auf die häufigen Zellenverluste zurückzuführen. Zusammen mit

Tabelle 6 und Tabelle 7 werden die Ursachen für die Reaktionszeiten transparent.

Die Zellverlustrate wurde in beiden Richtungen gleich gewählt. Ein Nachrichtenzyklus ist aus PROFIBUS-Sicht erst dann abgeschlossen, wenn die zu einem Request gehörende Response eingetroffen ist, unabhängig von der Anzahl der Wiederholungen. Die maximale Anzahl der Wiederholungen wird vor dem Systemstart parametrisiert. Der höchste einzustellende Wert ist acht. In Abbildung 48 ist ersichtlich, daß bei diesem sehr hohen CLR die Antwortzeiten dramatisch ansteigen. Diese hohen Zykluszeiten wirken sich auch auf die nachfolgenden Übertragungszyklen aus, weil sich die Warteschlange des Masters mit Anforderungen von Schicht 7 füllt, während Retransmissionen stattfinden.

Bei einer Zellenverlustrate von 10^{-1} gingen während der Simulation 1806 Token verloren. Bei 4 Telegrammen gelang eine erfolgreiche Übertragung erst im fünften Versuch. Bei 19 Telegrammen waren zwei Versuche notwendig. Abbildung 49 zeigt bei einer Zellenverlustrate von 10^{-3} bereits wesentlich bessere Resultate bei der Übermittlung der Token und Telegramme. Hier war die einmalig wiederholte Übertragung lediglich bei 2 Telegrammen erforderlich. Mehr Wiederholversuche brauchte kein Telegramm oder Token. Da der PROFIBUS mit ernstesten Problemen konfrontiert wird, wenn Token in wiederholtem Maße nicht korrekt zwischen den aktiven Teilnehmern ausgetauscht werden, muß jeder Tokenverlust als kritisches Ereignis angesehen werden.

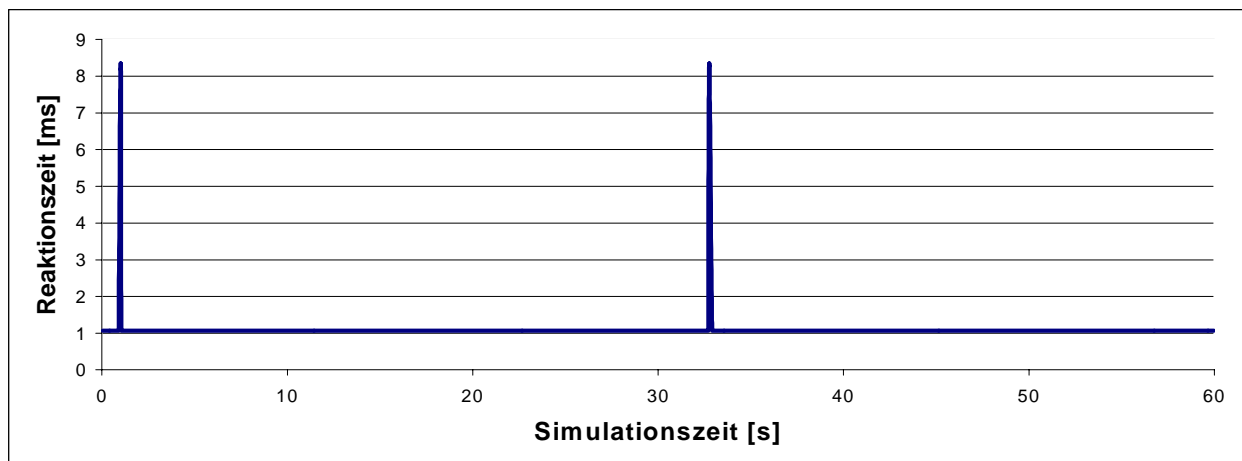


Abbildung 49: Reaktionszeit bei einer Zellverlustrate von 10^{-3}

Es steht außer Frage, daß Zellenverlustraten von 10^{-1} bis 10^{-3} keine akzeptablen Werte für ein über ATM gekoppeltes PROFIBUS-System sind. Mit Simulationen von Zellverlustraten ab 10^{-4} wurden während der Simulationszeit von 60 Sekunden keine Verluste mehr registriert.

Bei einer Zellverlustrate von 10^{-7} geht im Durchschnitt bei dem Simulationsszenario nur alle 13 Stunden eine Zelle verloren. Die Qualität der aktuell eingesetzten Leitungen und ATM-Switches läßt eine Zellverlustrate von 10^{-7} mindestens zu. Typischerweise liegen diese Werte bei 10^{-9} bis 10^{-10} .

Zellverlustrate	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
Verlorene Token	1806	197	19
Verlorene Telegramme	608	63	12
Abgewinkelte Nachrichtenzyklen	587	1019	1065

Tabelle 6: Einfluß der Zellverlustrate auf die Token- und Telegrammübertragung

Insgesamt läßt sich aus den Simulationen zu den Zellverlustraten folgende Forderung ableiten. Da bei PROFIBUS jede Zelle relevante Informationen trägt, sehr kurze Reaktionszeiten gefordert sind und insbesondere Tokenverluste systemweite Konsequenzen nach sich ziehen können, sind Zellverlustraten in der Nähe des theoretisch Möglichen anzustreben.

Anzahl Übertragungswiederholungen	1	2	3	4	5
Zellverlustrate					
10^{-1}	19	14	9	2	4
10^{-2}	6	-	-	-	-
10^{-3}	2	-	-	-	-

Tabelle 7: Übertragungswiederholungen in Abhängigkeit von der Zellverlustrate

Grundsätzlich gilt, daß im verwendeten System aber auch generell im PROFIBUS Systemen im Vergleich zu anderen Datenquellen nur relativ sporadisch Zellen übertragen werden. Darüber hinaus sind auftretende Bursts, Anhäufungen von Zellen, die mit der Spitzenzellenrate direkt hintereinander gesendet werden, nur von sehr begrenzter Länge. Bei PROFIBUS ist ein solcher Burst, resultierend aus den maximalen Telegrammlänge, nur höchstens 6 Zellen lang.

4.4.5 Untersuchung der Auswirkungen von Interferenzdatenverkehr

4.4.5.1 Vorbetrachtungen

Im Grundlagenkapitel wurde auf die Bedeutung der Pufferung von Zellen in den ATM-Switchen hingewiesen, um temporäre Überlastsituationen kompensieren zu können. Der Aufenthalt in einem solchen Puffer bedeutet für die betroffenen Zellen aber jedesmal eine Verzögerung. Diese Verzögerung hängt von der Intensität der Überlast ab, d.h. wie viele Zellen vorher noch zur Aussendung anstehen und darüber hinaus noch von der Gesamtkapazität der Puffer. Große Puffer bewirken zwar, daß Zellen tendenziell nicht verworfen werden müssen, führen aber zu verhältnismäßig langen Verzögerungen. Lange Verzögerungen sind bei PROFIBUS-Datenaustausch nicht erwünscht. Die folgenden Simulationsergebnisse widerspiegeln Resultate, die bei der Mischung von PROFIBUS-Datenverkehr mit einer Hinter-

grundlast entstehen. Es sollen Rückschlüsse aus der Übertragungsverzögerung auf die Parametrierung der Slot-Zeit für ein über ATM gekoppeltes PROFIBUS-System gezogen werden.

4.4.5.2 Simulationsszenario

Auf der Basis eines Szenarios, bei dem PROFIBUS-Datenverkehr mit einer Hintergrundlast um dieselben Ressourcen konkurriert, wurde untersucht, welchen Einfluß interferierende Datenströme auf die Verzögerung von Zellen, die PROFIBUS-Telegramme transportieren, innerhalb des ATM-Netzes ausüben. Dabei spielen die Parameter Cell Transfer Delay (maxCTD) und Cell Delay Variation (CDV) die entscheidende Rolle. Aus der Sicht der PROFIBUS-Anwendung wurde bereits erwähnt, daß die Verzögerung so gering wie möglich gehalten werden soll. Die Varianz der Zellenverzögerung spielt hingegen nur eine untergeordnete Rolle. Verwendung fand dasselbe Simulationssystem, das bei der Bestimmung der Zellverluste genutzt wurde. Hinzugefügt wurden jedoch interferierende Datenströme mit dem Ziel, den Ausgangsport an einem Switch, den auch die Zellen der PROFIBUS-Verbindung passieren müssen, zu belasten. Jedem Port ist eine Warteschlange zugeordnet. In temporären Überlastsituationen kann sich die Warteschlange bis zu ihrem Maximum von 5000 Zellen im simulierten System füllen. Dies verzögert die Zellen, insbesondere dann, wenn Zellen unterschiedlicher Verbindungen auf einen Ausgangsport gemultiplext werden müssen. Generell ist ein Switch bemüht, bereits in der Phase der Signalisierung die Ressourcen für neu hinzukommende Verbindungen nur soweit zu vergeben, daß bereits bestehende Verbindungen nicht beeinträchtigt werden. Ihnen hat der Switch die geforderte Dienstgüte garantiert. Trotzdem können, bedingt durch die Funktionalität des statistischen Multiplexing, sowohl bei Poisson-Verkehr, aber mehr noch bei selbstständlichem Datenverkehr, in gewissen Grenzen Überlastsituationen auftreten. Solche Situationen zu provozieren und deren Auswirkungen auf die PROFIBUS-Verbindung zu untersuchen, war das Ziel weiterer Simulationen, deren Ergebnisse im folgenden vorgestellt werden. Abbildung 50 zeigt das dazu erweiterte Basismodell. Verschiedene Datenströme unterschiedlicher Charakteristik werden zusätzlich als Hintergrundlast in das aus drei ATM-Switchen bestehende ATM-Netz eingespeist.

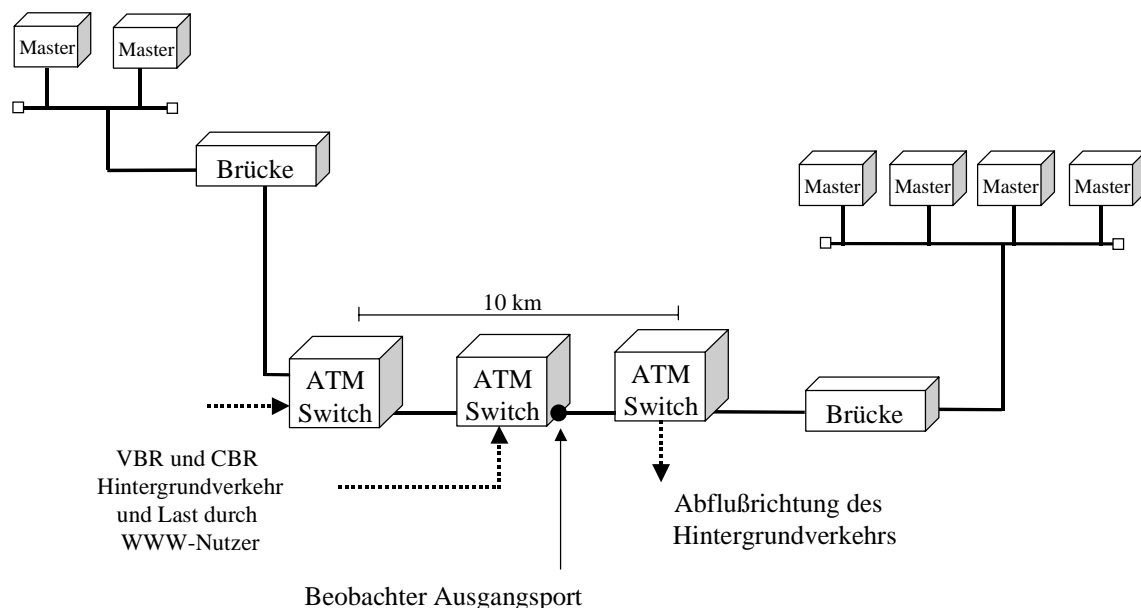


Abbildung 50: Erweitertes Basissystem mit simuliertem Hintergrundverkehr

Die ATM-Switche besitzen 16-Ports. Der PROFIBUS-Datenverkehr muß alle drei Switche passieren. Teildatenströme des Hintergrundverkehrs werden in den linken Switch eingespeist. Am mittleren Switch kommen weitere Datenströme hinzu. Die Beobachtungen konzentrierten sich auf die Ausgangswarteschlange des mittleren Switches auf den sich der PROFIBUS-Verkehr und auch die Summe des Hintergrundverkehrs konzentriert. Der Hintergrundverkehr verläßt den rechten Switch auf einem anderen Port als der PROFIBUS-Verkehr in Abbildung 50.

Den Hintergrundverkehr, eingespeist in den linken Switch, bildeten 100 Datenströme mit variabler Datenrate entsprechend der Quelle, die in Anhang A beschrieben ist. Die durchschnittliche Datenrate der VBR-Quellen betrug 128 Kbit/s. Hinzu kamen vier CBR-Datenquellen mit insgesamt 8 Mbit/s Datenrate.

In den zweiten Switch wurden weitere 20 VBR-Quellen mit jeweils einer mittleren Datenrate von 256 Kbit/s eingespeist, sowie zwei VBR-Quellen mit je 5 Mbit/s mittlerer Datenrate und 20 CBR-Quellen mit je 64 Kbit/s. Ferner wurden von mehreren lokalen Netzen mit insgesamt 200 WWW-Nutzern aggregierte Datenströme eingespeist. Die WWW-Nutzer erzeugen Datenströme entsprechend dem in Anhang A dargestellten Modell.

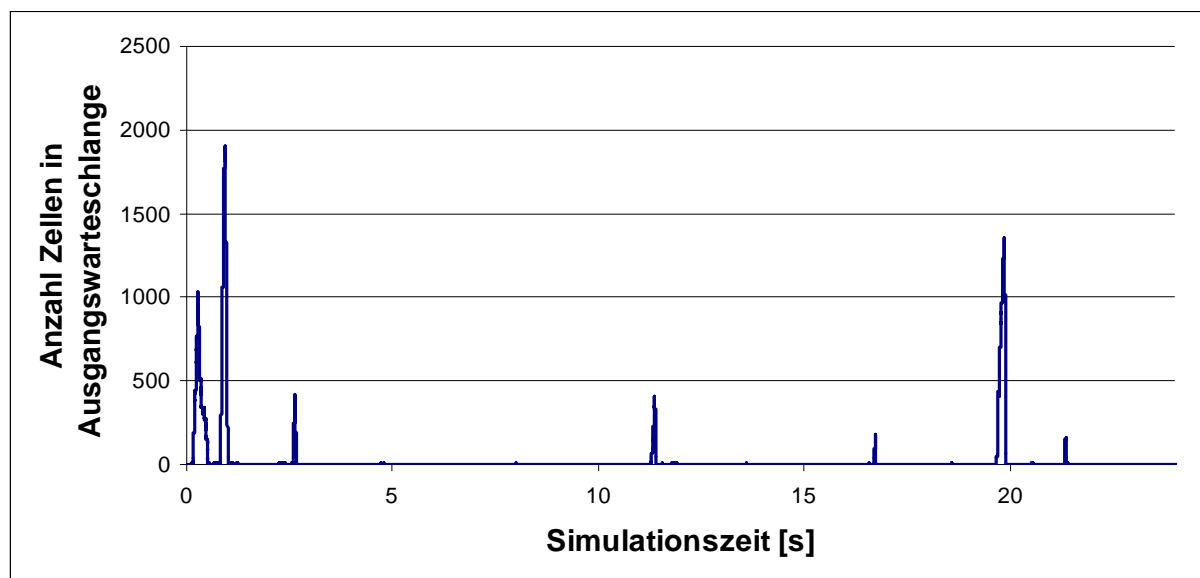


Abbildung 51: Warteschlangenlänge bei Simulation mit Hintergrundlast

Am links in der Abbildung dargestellten Switch treffen die Zellen der interferierenden Datenströme bereits mit PROFIBUS Daten von der Brücke zusammen und konkurrieren um den Ausgangsport in Richtung des zweiten Switches. Die Datenströme unterliegen dabei bereits einer Formung durch das Multiplexen auf den einen Port. Auf dem weiteren Weg durch das ATM-Netz passieren die Zellen der PROFIBUS-Telegramme den zweiten und den dritten Switch rechts in Abbildung 50. Am Ausgangsport des mittleren Switches konkurrieren die Zellen mit weiteren Zellen, die zu Datenströmen der beschriebenen Hintergrundlast gehören. Ist die Summe der eintreffenden Zellen größer als die Rate mit der die Zellen auf den Ausgangslink gesendet werden, baut sich eine Warteschlange auf.

Abbildung 51 zeigt das den Auf- und Abbau von Warteschlangen am beobachteten Ausgangsport des mittleren Switches. Die längste Zeit des Ausschnittes der Simulation hat die

Warteschlange keinen nennenswerte Länge. In einigen Situationen jedoch beginnt sie sich schnell zu füllen und wird dann ebenfalls schnell wieder abgebaut.

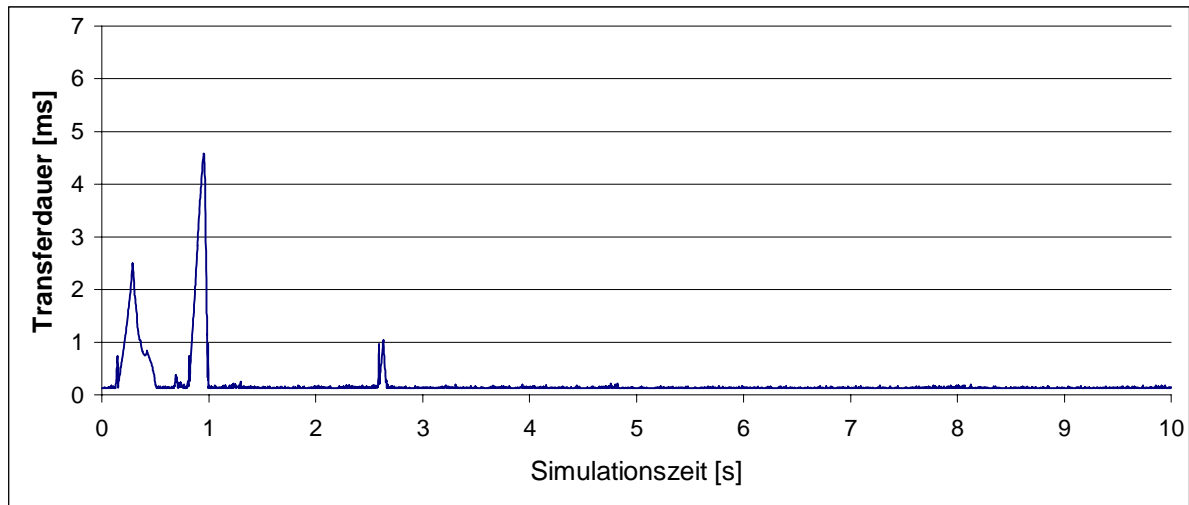


Abbildung 52: Transferdauer für Token bei Hintergrundlast

Den höchsten Füllstand erreicht sie mit fast 1900 Zellen. Daß dies nicht ohne Auswirkungen auf den PROFIBUS-Datenverkehr blieb, zeigt Abbildung 52. Dort ist die reine Transferdauer der Zellen, die Token durch das ATM-Netz transportierten, abgetragen. Auf bis zu 4,5 ms erhöhte sich im Extremfall der Transport durch das ATM-Netz, der im optimalen Fall nach 118 μ s abgeschlossen ist.

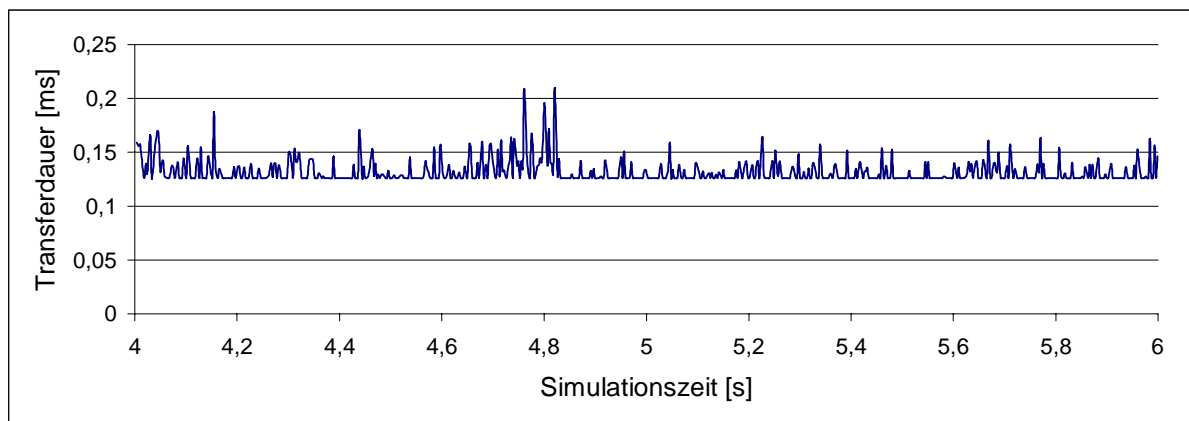


Abbildung 53: Transferdauer für Token bei Hintergrundlast (Ausschnitt vergrößert aus Abbildung 52)

Abbildung 53 zeigt einen Ausschnitt aus Abbildung 52 zwischen Sekunde 4 und Sekunde 6 der Simulationszeit. Die auch schon in Abbildung 52 erkennbare Schwankung der Transferdauer wird in dem veränderten Maßstab von Abbildung 53 deutlicher. Die Schwankungsbreite beträgt hier bis zu 100 μ s

Die Telegramme mit einer Länge von 250 Byte müssen in mehreren Zellen transportiert werden. Demzufolge dauert der Transfer länger als bei den Token. Die Brücken senden die Zellen

der Telegramme im Blockmodus mit einer Spitzenzellenrate, die 3 Mbit/s entspricht. Daraus resultiert eine minimale Verzögerung von 818 μ s für ein Datentelegramm.

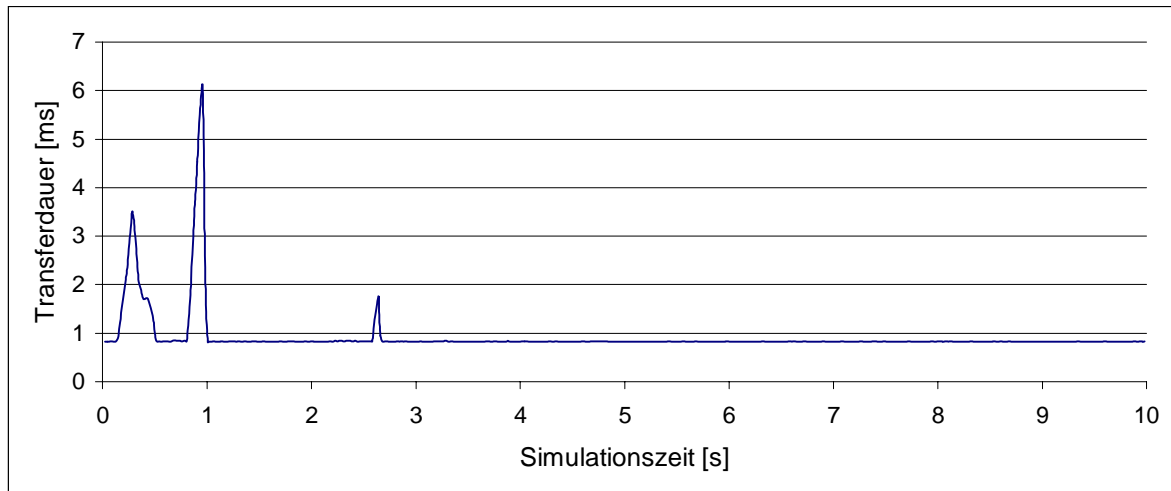


Abbildung 54: Transferdauer für Telegramme bei Hintergrundlast

Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen, daß auch die Zellen, die Telegrammfragmente transportierten, durch die Warteschlangenbildung verzögert wurden. In der höheren Auflösung von Abbildung 55 wird deutlich, daß zwar einige Telegramme mit der minimal erreichbaren Verzögerung das ATM-Netz passieren konnten, der größere Anteil jedoch leicht längere Verzögerungen erfahren hat.

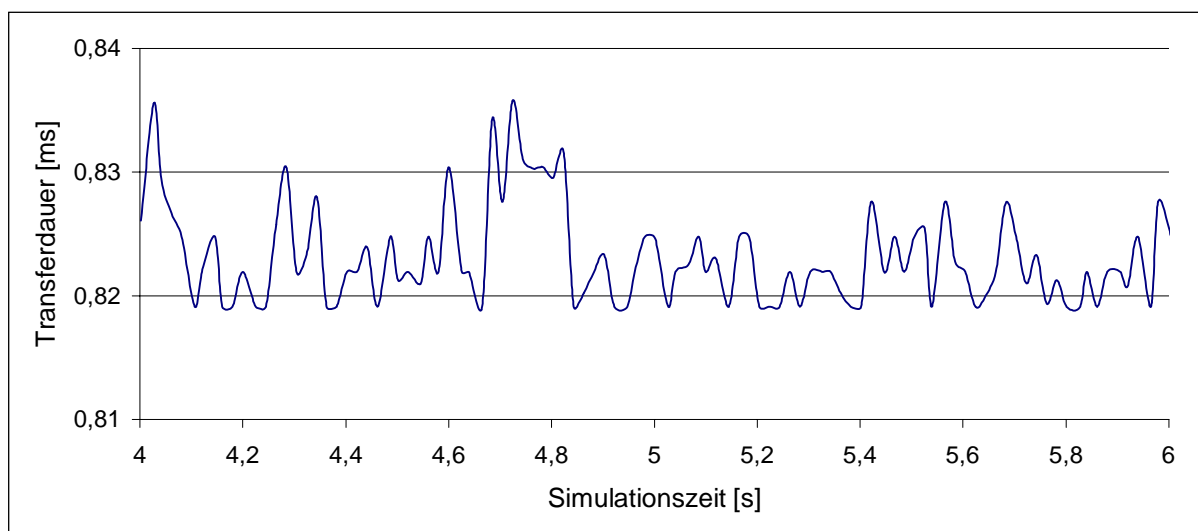


Abbildung 55: Transferdauer für Telegramme bei Hintergrundlast (Ausschnitt vergrößert aus Abbildung 54)

Dadurch erhöht sich auch die Zeit pro Nachrichtenzyklus, bzw. pro Tokenzyklus. Mit dem Ziel der Wahrung der Systemstabilität vor Augen müssen aus den Simulationen Schlüsse für die Parametrierung abgeleitet werden.

Die Warteschlange am beobachteten Ausgangsport des Switches kann bis zu 5000 Zellen enthalten, was einer Kapazität von 256 KByte entspricht und eine gängig Größe aktuell einge-

setzter ATM-Switches ist. Es sei betont, daß mit der Konstellation der Hintergrundlast beabsichtigt war, in hohem Maße Überlastsituationen zu provozieren und diese gewählt wurde, um das Verhalten des modellierten ATM-Switches unter solchen Lastsituationen nachzuvollziehen. Der modellierte Switch verfügt über keine Zugangskontrollmechanismen, wie sie das ATM-Forum in [TM40] definiert. Ob ähnlich kritische Situationen in der Praxis entstehen, hängt hauptsächlich davon ab, wie ein Switch seine Ressourcen verwaltet, ob und wie Verkehrsverträge überwacht werden bzw. ab welcher Schwelle ein Switch neue Verbindungsaufbauwünsche zugunsten der Einhaltung zugesicherter Dienstqualitäten bestehender Verbindungen ablehnt. Dies unterliegt zum großen Teil herstellerabhängiger Implementationstechnik. Das ATM-Forum und die ITU geben dafür aber Richtlinien vor.

In dem beschriebenen Simulationsszenario traten keine Zellverluste auf, die durch Pufferüberläufe bedingt wurden. Die große Kapazität der Warteschlange grenzt zwar Zellverluste ein, hat jedoch den Nachteil, daß sich die Transferdauer verlängert. Zur Kompensation dessen muß die Slot-Zeit entsprechend verlängert werden.

Der Einfluß einer Warteschlange mit geringerer Kapazität von 500 Zellen wurde in einer weiteren Simulation untersucht, deren Ergebnisse in den folgenden Abbildungen dargestellt sind. Als Hintergrundlast wurden dieselben Datenströme verwendet. Einziger Unterschied ist die reduzierte Warteschlangenkapazität der Switches. Abbildung 56 zeigt den Füllstand der beobachteten Warteschlange, der mehrfach sein Maximum erreicht. In diesem Zustand weiter eintreffende Zellen wurden verworfen, wovon insgesamt 24 Zellen, die Token oder Telegrammteile transportierten, gehörten.

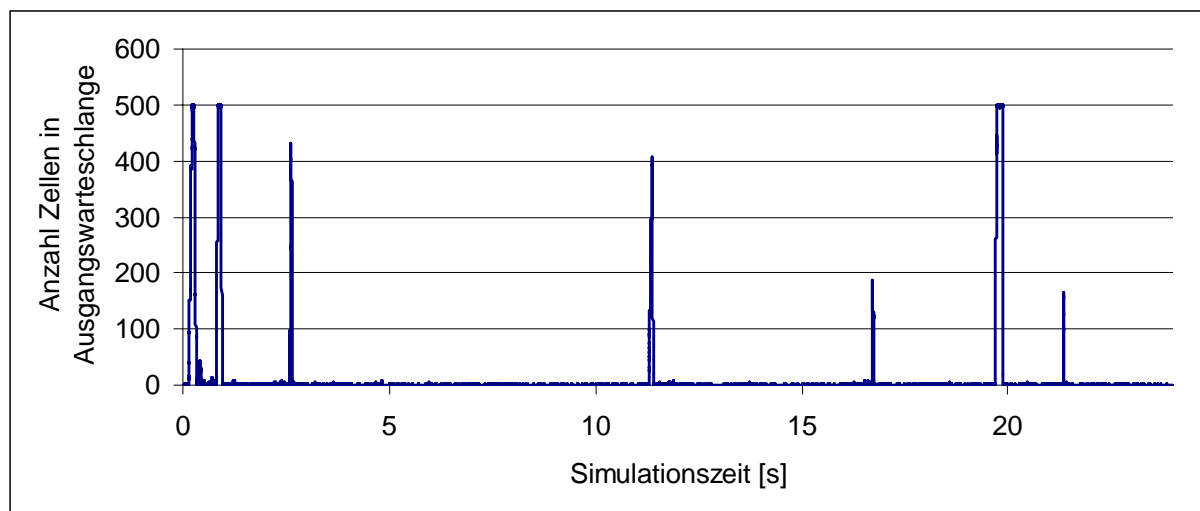


Abbildung 56: Füllstand der Warteschlange (Kapazität 500 Zellen)

In 6 der 24 Zellen wurden Token transportiert. In 18 der verworfenen Zellen waren Telegrammfragmente enthalten. Insgesamt wurden etwa gleich viele Token- (7205) und Telegrammzellen (7140) übertragen. Vom Zellverlust waren jedoch dreimal so viele Telegrammzellen betroffen wie Token-Zellen. Dies läßt den Schluß zu, daß durch das dichte aufeinanderfolgen der 6 zu einem Telegramm gehörenden Zellen für die nicht erfolgreiche Übertragung eines Telegramms eine größere Gefahr besteht als für die eines Tokens.

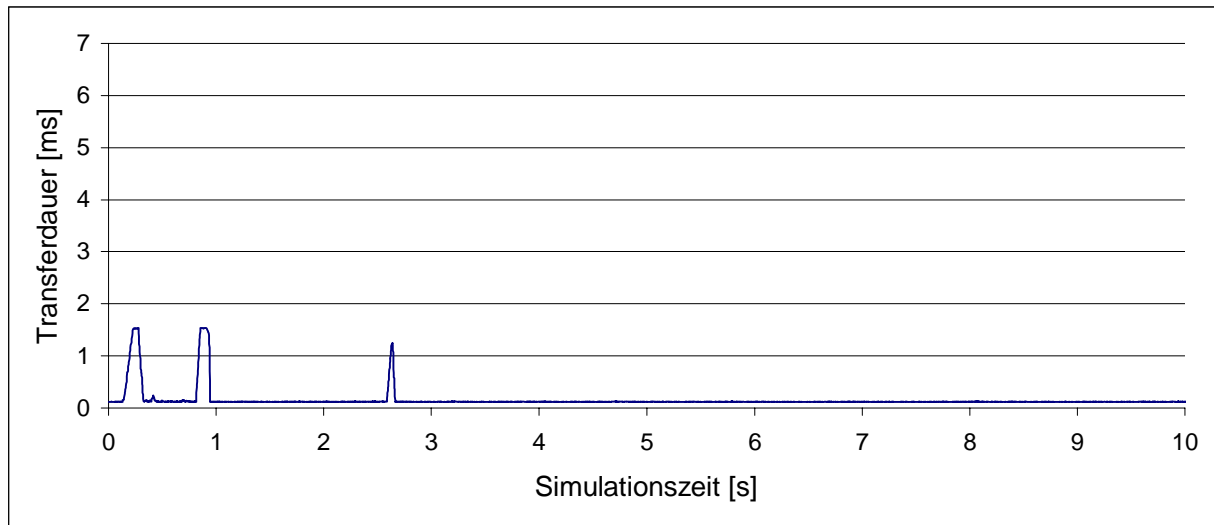


Abbildung 57: Transferdauer für Token

Sieht man von dem nachteiligen Effekt der Tokenverluste bedingt durch die Zellverluste ab, so ergeben sich im Vergleich zwischen Abbildung 57 und Abbildung 52 für die Extremsituationen geringere Transferzeiten. Ein ähnliches Bild stellt sich bei Vergleich von Abbildung 58 und Abbildung 54 für die Telegramme dar.

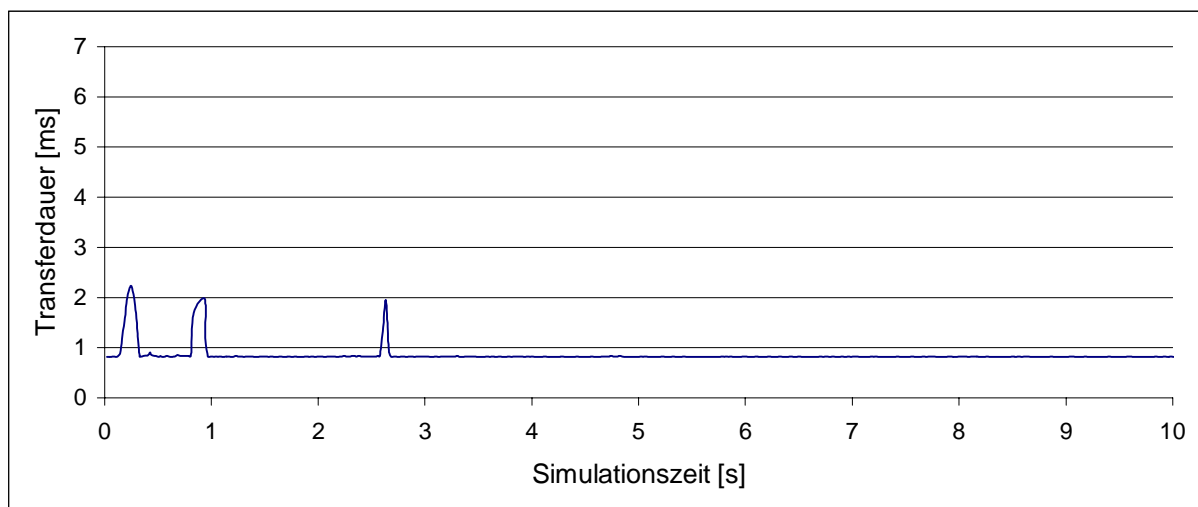


Abbildung 58: Transferdauer für Telegramme

4.4.5.3 Rückwirkungen auf die PROFIBUS Parametrierung

PROFIBUS besitzt eine Reihe von Parametern, die aber nicht alle die Leistungsfähigkeit beeinflussen. Im folgenden wird zunächst die Auswahl der relevanten Parameter der Schicht 2 eingeschränkt. Im Anschluß werden die Einflüsse einzelner Parameter theoretisch bestimmt und durch empirische Untersuchungen gestützt.

Vom Anwender sind vor allem unter Leistungsgesichtspunkten die folgende Parameter optimal einzustellen.

- Slot-Time

Die Slot-Zeit erlangt bei Fehlerfällen sowie beim Versuch der Aufnahme neuer Stationen Bedeutung. Die Spanne der Slot-Zeit beginnt nach dem Aussenden des letzten Bits beim Initiator und endet mit dem vollständigen Empfang des ersten Zeichens des folgenden Telegramms. Die Slot-Zeit muß die Übertragungsdauer in beide Richtungen sowie die Leitungsverzögerung und die Stationsverzögerung des Empfängers berücksichtigen. Zur Vermeidung von nicht notwendigerweise ausgelösten Übertragungswiederholungen muß die Slot-Zeit unter der Berücksichtigung der Verlängerung der Übertragungszyklen im gekoppelten PROFIBUS entsprechend verlängert werden.

- MinT_{SDR}

Der Parameter entspricht dem Minimum der Protokollbearbeitungszeiten aller Responder. Die schnellste Station im Netz darf frühestens nach minT_{SDR} antworten. MinT_{SDR} darf jedoch nicht beliebig klein gewählt werden, damit auch der langsamste Initiator im System die Antwort korrekt empfangen und bearbeiten kann. Die Auswirkungen auf ein gekoppeltes System liegen in den möglicherweise variierenden Übertragungsverzögerungen und in den unterschiedliche langen Übertragungswegen verbunden mit einer verschiedenen Anzahl zu passierender Switches. Um zu vermeiden, daß zwei Telegramme zu dicht aufeinanderfolgen, sollte minT_{SDR} um den Wert der Übertragungsschwankungen (CDV) erhöht werden. Der gleiche Effekt wird erzielt, wenn die Brücken beim Einspeisen des Telegramms in den PROFIBUS für einen minT_{SDR} entsprechenden Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Telegrammen sorgen. Durch eine angepaßte minT_{SDR} wird jedoch das Gesamtsystem verlangsamt. Sorgen die Brücken für einen korrekten Abstand zwischen den Telegrammen, so kann es zu Anhäufungen auf temporär überlasteten Verbindungen zu Anhäufungen von Telegrammen kommen, die noch nicht an den PROFIBUS ausgeliefert wurden.

Eine zu groß gewählte minT_{SDR} verzögert alle Quittungs- und Antworttelegramme unnötig. Der Einfluß auf die Reaktionszeit und den Durchsatz ist insgesamt als stark einzuschätzen.

- MaxT_{SDR}

Analog zur kleinsten stellt die größte Stationsverzögerungszeit der Responder das Maximum der Protokollbearbeitungszeiten aller Responder eines Systems dar. Der langsamste Teilnehmer muß innerhalb von maxT_{SDR} antworten. Nach dem Senden eines nicht zu quittierenden Aufruftelegramms muß der Initiator die Idle-Time, welche maxT_{SDR} entspricht, abwarten, wodurch beispielsweise die Token-Weitergabe verzögert wird.

- Token-Soll-Umlaufzeit (T_{TR})

Die Token-Soll-Umlaufzeit sichert die Einhaltung der benötigten Systemreaktionszeit. Pro Tokenerrhalt müssen grundsätzlich mindestens die hochprioren Nachrichtenzyklen abgewickelt werden können. Eine exakte untere Schranke für die Token-Soll-Umlaufzeit anzugeben ist schwierig, da die Länge von Telegrammen sowie die Anzahl Übertragungswiederholungen im Verlauf stark schwanken können. Aus der Sicht einer Station muß aber gewährleistet sein, daß sie in angemessener Zeit auch ihre niederprioren Nachrichtenzyklen abwickeln kann.

Eine insgesamt zu klein bemessene T_{TR} läßt den Teilnehmern zu wenig Zeit, ihre Nachrichtenzyklen abzuwickeln. Kommunikationswünsche bleiben unberücksichtigt und werden sich anstauen. Eine sehr groß gewählte Token-Soll-Umlaufzeit erlaubt den Teilnehmern, die kurzzeitig viele Kommunikationsanforderungen abwickeln wollen, dies innerhalb einer Tokenhaltezeit zu tun. Schöpft ein Teilnehmer die große Tokenhaltezeit aus, so hat dies innerhalb des aktuellen Tokenumlaufs Auswirkungen auf die Zeitpunkte und die Anzahl der Nachrichtenzyklen der anderen Teilnehmer. Im Extremfall können nachfolgende Übertragungen um fast eine gesamte verlängerte Tokenhaltezeit verzögert werden. In einem gekoppelten System wirken sich die verlängerten Zykluszeiten sowohl der Tokenzyklen als auch der Nachrichtenzyklen kumulativ auf die gesamte Systemlast aus. Die Token-Soll-Umlaufzeit muß entsprechend höher angesetzt werden, um den PROFIBUS nicht auszubremsten. Erst wenn alle Stationen innerhalb der ihnen zustehenden Haltezeit alle Anforderungen absenden können, stellt die Token-Soll-Umlaufzeit keine Einschränkung mehr dar.

- **GAP-Faktor**

Der GAP-Faktor ist für den laufenden Betrieb in Zusammenhang mit der Slot-Zeit zu sehen. Bei laufendem Betrieb stellen GAP-Aktualisierungen eine zwar notwendige aber unerwünschte Belastung dar. Lange Slot-Zeiten und kurze GAP-Überprüfungsrhythmen schränken die Kommunikationskapazität unnötig ein. Zur Vermeidung unnötiger GAP-Überprüfungen sollte die Adreßvergabe möglichst lückenlos sein. Während der erfolglosen Suche nach neuen Teilnehmern verstreicht bei jedem Zyklus eine Slot-Zeit. Die durch die Kopplung erzwungene Verlängerung der Slot-Zeit hat damit einen kumulativen Einfluß auf die Reaktionszeiten und den Gesamtdurchsatz an Nachrichten im System.

4.4.5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Simulationen

Mit der Simulation von Zellenverlusten und der Untersuchung von potentiellen Auswirkungen von Hintergrundverkehr wurden Einflüsse von ATM aufgezeigt, welche mindestens die Systemreaktionszeiten und in extremen Fällen auch die Systemstabilität beeinträchtigen können. Auf Zellenverluste kann das PROFIBUS-System nur mit wiederholter Aussendung des Telegramms reagieren. Die maximal tolerierbare Verzögerung hingegen kann beim Aufbau der ATM-Verbindung am Netzzugangspunkt ausgehandelt werden. Der vereinbarte Wert ist dann entsprechend in die Kalkulation der Slot-Zeit aufzunehmen. Durch Zellen, die über die maximal tolerierbare Verzögerung hinaus eintreffen, werden dann nur noch selten Übertragungswiederholungen verursacht.

4.5 Bewertung des Kopplungsansatzes

4.5.1 Einsatzgrenzen des Kopplungsansatzes

Bei Vergleich der Werte der beiden diskutierten Szenarien werden Konsequenzen für die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems deutlich. Diese Grenzen sollen in diesem Abschnitt in sowohl a) räumlicher Hinsicht, als auch in b) nach minimal zu erreichender Antwort-/ bzw. Zykluszeit betrachtet werden.

Aus den durchgeführten Betrachtungen zum Verhalten eines PROFIBUS-Gesamtsystems und gestützt auf Simulationen ergeben sich folgende Ableitungen.

Die zusätzliche Verzögerung resultierend aus dem Transport der PROFIBUS Telegramme durch das ATM-Netz wirkt sich auf jeden Nachrichtenzyklus aus. Ebenso ist diese Verzögerung in den Token-Weitergabezyklen enthalten. Damit vervielfacht sich diese Verzögerung entsprechend der Anzahl auszutauschender Nachrichten und der Anzahl aktiver Stationen pro Tokenumlauf.

Die Nachrichtenrate R_{SYS} in einem System entspricht der möglichen Anzahl Nachrichtenzyklen je Sekunde $R_{SYS} = 1 / t_{MC}$; $t_{MC} = T_{MC} * t_{BIT}$

Die maximale Systemreaktionszeit in einem System mit mehreren aktiven und passiven Teilnehmern entspricht der Token-Soll-Umlaufzeit.

Die Grundlast in einem PROFIBUS wird hervorgerufen durch die Anzahl und die Dauer der Tokenweitergabevorgänge. Tokenzyklen nehmen im Verhältnis zur Anzahl der Nachrichtenzyklen in einem wenig belasteten PROFIBUS den weitaus größeren Teil ein. Anhand der Grundlast ist zu ermitteln, ab welcher Anzahl von Mastern das System bereits mit seiner Grundlast so stark beschäftigt ist, daß nur noch wenige Nachrichtenzyklen pro Tokenumlauf überhaupt möglich sind.

- a) Die maximale räumliche Ausdehnung eines transparent gekoppelten PROFIBUS
- b) Die minimale Reaktionszeit

4.5.2 Entwurfskriterien eines transparent gekoppelten PROFIBUS Systems

In engem Zusammenhang mit den Einsatzgrenzen der transparenten Kopplung von PROFIBUS-Teilsegmenten stehen die folgenden grundlegenden Zusammenhänge, deren Kenntnis und optimale Ausnutzung den Entwurf und die Parametrierung eines PROFIBUS-Systems erleichtern.

Vor der Implementation eines Systems entsprechend dem oben diskutierten Szenario muß für jeden Anwendungsfall die Durchführbarkeit gesondert bestimmt werden. Axel Funke entwirft in seiner Dissertation [Funk92] eine Vorgehensweise zur Machbarkeitsanalyse von Feldbusanwendungen, die im konventionellen Sinne auch auf den PROFIBUS angewendet werden kann. Die Machbarkeitsanalyse basiert auf der Summation der Zeitdauer für die einzelnen Nachrichtenzyklen und Tokenzyklen. Die Häufigkeit der Nachrichtenzyklen wird anhand der Abstände der Anforderungen bestimmt. Ist es unter Verwendung der gegebenen Datenrate möglich, alle pro Zeiteinheit angeforderten Nachrichtenzyklen abzuwickeln, gilt das System als machbar.

In einem transparent gekoppelten PROFIBUS ist es ebenfalls möglich, die grundsätzliche Machbarkeit einer PROFIBUS-Anwendung mit den Methoden der Machbarkeitsanalyse zu prüfen bzw. nachzuweisen. Dazu sind die durch die Zwischenschaltung des ATM-Netzes verlängerten Nachrichtenzyklen und Tokenzyklen heranzuziehen und entsprechend dem Verfahren aufzusummieren.

Unabhängig von konkreten Beispielen und der Methode der Machbarkeitsanalyse stehen im folgenden einige generelle Kriterien, die während des Entwurf des Kopplungsmodells und der Simulationen als bedeutsam erkannt wurden, im Mittelpunkt der Diskussion.

Einfluß auf die Gesamtleistung eines gekoppelten Systems haben danach die Telegrammlänge, die Gesamtausdehnung des PROFIBUS, die Datenrate des PROFIBUS und die Wahl der

Spitzenzellenrate am UNI des ATM-Netzes. Darüber hinaus bestimmt die Arbeitsweise der Brücke bei der Umsetzung der Telegramme in Zellen und umgekehrt eine entscheidende Rolle. Im Abschnitt 3.8 wurden die beiden Modi dazu vorgestellt. Beide werden im folgenden bezüglich der verursachten Übertragungszeiten gegenübergestellt.

Bestandteil der Übertragungsdauer	Blockmodus	Strom-Modus
A	Sendezeit des PROFIBUS-Telegramms	Sendezeit des PROFIBUS-Telegramms
B	Brücken-Verzögerung	Brücken-Verzögerung
C	Sendezeit für die Zellen am UNI	Sendezeit für die Zellen am UNI
D	Durchschaltverzögerung pro zu passierenden ATM-Switch	Durchschaltverzögerung pro zu passierenden ATM-Switch
E	Sendezeit der Zellen auf den Verbindungen zwischen den Switches	Sendezeit der Zellen auf den Verbindungen zwischen den Switches
F	Brücken-Verzögerung (entfernte Brücke)	Brücken-Verzögerung (entfernte Brücke)
G	Sendezeit des PROFIBUS-Telegramms	Sendezeit für die restlichen Bytes des PROFIBUS-Telegramms

Tabelle 8: Gegenüberstellung Blockmodus und Strom-Modus

Der grundlegenden Unterschied zwischen beiden Verfahren in Bezug auf die Dauer einer Übertragung zwischen zwei PROFIBUS-Segmenten liegt darin, daß im Strom-Modus bereits Zellen mit Telegrammteilen im ATM-Netz unterwegs sein können, während ein Teil des Telegramms noch nicht die Brücke erreicht hat. Dies ist besonders dann der Fall, wenn das Telegramm sehr lang ist. Der Strom-Modus beschleunigt die Übertragung. Beim Blockmodus hingegen wird das Telegramm in beiden Brücken komplett zwischengespeichert. Dadurch unterscheiden sich beide Modi entsprechend Tabelle 8 im Übertragungsbestandteil G.

Wird nur eine Zelle zur Übertragung des Telegramms benötigt, unterscheiden sich beide Verfahren hinsichtlich der Übertragungsdauer nicht.

Damit wird deutlich, daß die Telegrammlänge beim Block-Modus einen fundamentalen Beitrag zu der zusätzlichen Verzögerung bedingt durch die Zwischenschaltung des ATM-Netzes leistet.

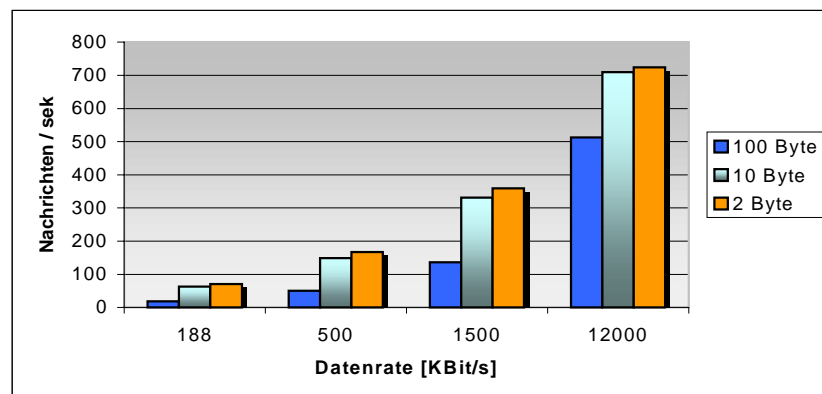
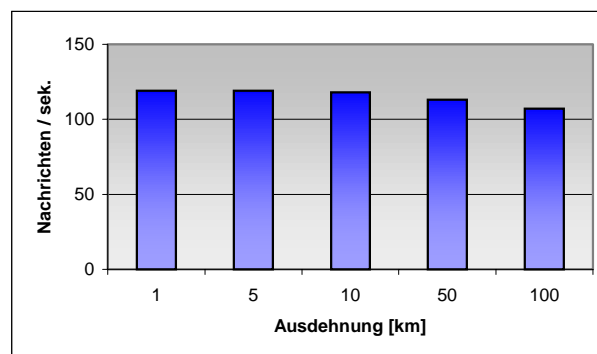


Abbildung 59: Nachrichtenrate in Abhängigkeit von der Telegrammlänge

In Abbildung 59 ist die maximal erreichbare Anzahl von Nachrichten einer Anwendung pro Sekunde abhängig von der Telegrammlänge (Datenumfang der Nachricht plus Telegrammkopf) bei unterschiedlichen Datenraten im Blockmodus dargestellt. Die Darstellung beruht auf der Berechnung für ein System, das aus zwei gekoppelten Segmenten mit jeweils einem Teilnehmer besteht. In einem Segment befindet sich der Initiator im anderen der Responder. Ermittelt wurde die maximale Anzahl austauschbarer Nachrichten pro Sekunde. Als Entfernung beider Segmente voneinander wurden 10 km zugrunde gelegt. Weitere Annahme ist, daß kein Hintergrundverkehr auf den ATM-Verbindungen vorhanden ist. Abgetragen sind die Nachrichtenraten für verschiedene PROFIBUS-Datenraten bei fester ATM-Spitzenzellenrate von 3 Mbit/s. Zwischen 2 und 10 Byte Telegrammlänge läßt sich kein signifikanter Unterschied feststellen. Die leichten Unterschiede werden durch die verschieden lange Übertragungsdauer auf dem PROFIBUS verursacht, welche mit zunehmender Datenrate weniger ins Gewicht fallen. Deutlich geringer bei allen gewählten Datenraten ist die Nachrichtenrate beim Austausch von 100 Byte langen Telegrammen. Ausschlaggebend hierfür ist zum einen die Übertragung des Telegramms in 3 Zellen und die hauptsächlich zu Buche schlagende Sendezeit auf dem PROFIBUS. Bei noch längeren Telegrammen verstärkt sich dieser Effekt.

Die Übertragung großer Telegramme, die in mehr als einer Zelle übertragen werden müssen, zieht dadurch gleichzeitig die Einstellung einer längeren Slot-Zeit nach sich. Große Telegramme können damit indirekt auch die Abwicklung aller folgenden Nachrichtenzyklen verzögern und bremsen das Gesamtsystem.

Abbildung 60 liegt die Übertragung von 30 Byte langen Telegrammen bei 500 KBit/s Datenrate des PROFIBUS und gleicher ATM-Datenrate zugrunde.



**Abbildung 60: Nachrichtenrate bei fester Datenrate
in Abhängigkeit von der Ausdehnung**

Auf der ATM-Verbindung wird für die Daten nur die Kapazität einer Zelle benötigt. Das ATM-Netz besteht aus 2 Switchen. Die Abbildung verdeutlicht den nur marginalen Einfluß der Ausdehnung des ATM-Netzes auf die Nachrichtenrate. Es ist zu erkennen, daß eine große Entfernung, die in der reinen Leitungsverzögerung resultiert, die Nachrichtenrate nur leicht verringert. Nicht unerwähnt bleiben sollte aber, daß jeder zu passierende Switch einen festen Teil zur Übertragungsverzögerung durch das Durchlaufen der Schaltmatrix beiträgt. Unberücksichtigt blieb bei der Betrachtung die variable Verzögerung durch temporäre Stausituationen.

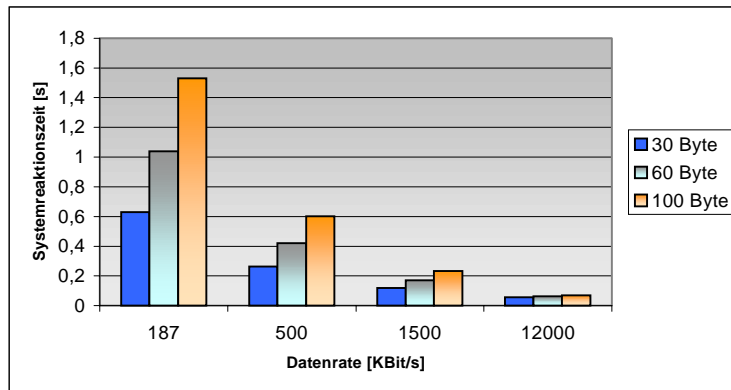


Abbildung 61: Systemreaktionszeit in Abhängigkeit von der Telegrammlänge

Als ein weiteres wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit kann die in Abbildung 61 gezeigte Systemreaktionszeit angesehen werden. Relevanz erlangt diese Betrachtungsweise für PROFIBUS-DP-Anwendungen. Dargestellt ist die Dauer der Abfrage von 30 passiven Stationen durch einen Master bei einer Systemausdehnung von 10 km bei verschiedenen Datenraten und verschiedenen Telegrammlängen. Der Master und die passiven Stationen befinden sich jeweils in getrennten Segmenten. Es ist ersichtlich, daß gerade bei langsamen Übertragungsraten der Einfluß einer großen Telegrammlänge stark leistungsmindernde Wirkung zeigt. Die Verwendung einer hohen Datenrate des PROFIBUS kann den Effekt teilweise kompensieren.

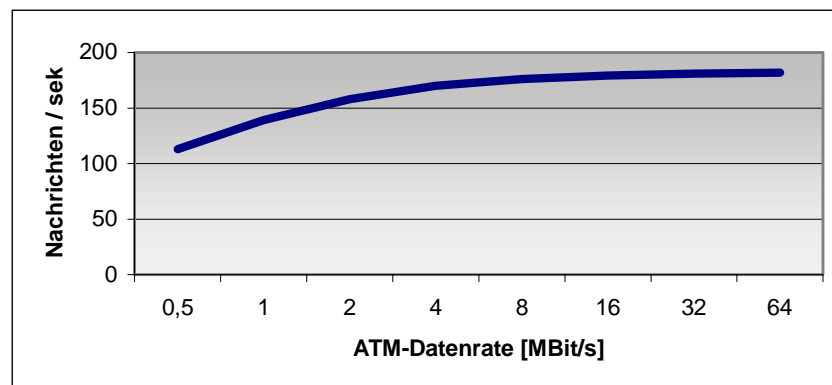


Abbildung 62: Nachrichtenrate in Abhängigkeit von der ATM-Datenrate

Die relative Abhängigkeit der Nachrichtenrate von der gewählten Spitzenzellenrate (reziprok zur ATM-Datenrate) am UNI zeigt Abbildung 62. Die Darstellung zeigt im wesentlichen, daß im Bereich sehr hoher Spitzenzellenraten die Nachrichtenrate nur noch leicht zunimmt. Die Begründung dessen liegt in den konstanten Abständen, mit denen Zellen übertragen werden. Die feste Länge von ATM-Zellen erlaubt diese konstanten Abstände. Bei einer Spitzenzellenrate, die 155 Mbit/s entspricht, darf die Anwendung jede Zelle belegen. Deutliche Unterschiede treten nur im Bereich geringer Spitzenzellenraten auf. Bei 500 Kbit/s ist es einer Anwendung erlaubt, etwa jede 310. Zelle zu belegen und bei 1 Mbit/s darf die Anwendung jede 155. Zelle verwenden. Die nicht belegten Zellen stehen einerseits anderen Anwendungen zur Verfügung, bedeuten andererseits aber Verzögerungen bei der Übertragung langer Telegramme, die sich schließlich in längeren Übertragungszyklen und in der geringeren Nachrichtenrate niederschlagen. Unter Kostenaspekten und unter der Prämisse des sparsamen Um-

ganges mit Ressourcen sind in Anbetracht der Abbildung 62 ATM-Verbindungen mit erheblich höheren Datenraten als die vom PROFIBUS verwendeten wenig sinnvoll.

Zusammenfassung

Beim Entwurf der PROFIBUS Anlage kommen auf den Systemdesigner ein insgesamt erweiterter Aufgabenbereich zu. Grundsätzlich muß bei der Wahl der optimalen systemweiten PROFIBUS-Parameter die neue Dimension der gesamten Anlage berücksichtigt werden. Die Überwachungszeiten müssen entsprechend den längeren Übertragungszyklen adaptiert werden. Die Token-Soll-Umlaufzeit hat der kumulativen Wirkung der längeren Nachrichtenzyklen und einer eventuell höheren Anzahl Wiederholzyklen Rechnung zu tragen. Insbesondere wegen der durch die längeren Überwachungszeiten stark bremsenden Wirkung der GAP-Aktualisierung müssen die Adressen der Teilnehmer möglichst lückenlos vergeben werden oder die Abfrageintervalle verlängert werden, um die Systemdynamik nicht einzuschränken. Dies impliziert wiederum Rückwirkungen auf den Entwurf der Kommunikationsbeziehungen zwischen den einzelnen Teilnehmern.

Im folgenden werden die jeweilig zu berücksichtigenden Faktoren aufgeführt und entsprechend ihrer Bedeutung für das Gesamtsystem gewichtet.

Wichtigkeit:

- * - marginal
- ** - relevant
- *** - entscheidend

Datenrate (Spitzenzellenrate) am UNI des ATM-Netzes	**
Datenrate des PROFIBUS	**
Telegrammlänge	***
Entfernung zwischen den Segmenten / Anzahl der Switche	*
Hintergrundverkehr im ATM-Netz	***
Zellenverluste im ATM-Netz	***
Anzahl aktiver Stationen (Tokenaufwand)	**

Tabelle 9: Einflußfaktoren auf die Reaktionszeiten

Auf die Beziehung zwischen Datenrate und Leitungslänge des PROFIBUS braucht bei Verwendung von ATM als Backbone nur begrenzt Rücksicht genommen zu werden, da die Überbrückung der Distanzen beim ATM-Netz liegt. Demzufolge kann der PROFIBUS mit hohen Datenraten betrieben werden. Die Anzahl der Switche und deren Auswirkungen auf den statischen Teil der Übertragungsdauer wird in Tabelle 9 als nur marginal eingeschätzt. Eine größere Anzahl aktiver Teilnehmer kann für die Nachrichtenrate relevant werden. Wie im konventionellen PROFIBUS erhöht sich dadurch die Grundlast. Im einem gekoppelten PROFIBUS ist die Grundlast durch die verlängerten Tokenzyklen noch höher und das Gesamtsystem kann zusätzlich durch Übertragungswiederholungen wegen Zellverlusten belastet werden. Von entscheidender Bedeutung ist die Last, die der Parallelverkehr (Hintergrundlast) im ATM-Netz hervorruft, und hier besonders die schwankenden Datenströme mit selbstähnlichem Charakter. Die Ergebnisse der Simulationen zu Zellverluststraten und Hintergrundlast haben den großen Einfluß von Warteschlangenverzögerungen und besonders von Zellverwerfungen aufgrund von Überlaufen der Warteschlangen auf den laufenden Betrieb eines PROFIBUS Systems gezeigt.

5 Kopplung von unabhängigen PROFIBUS-Segmenten

5.1 Systembeschreibung

Anders als beim ersten Ansatz der Verlängerung von PROFIBUS durch transparente Kopplung von Teilsegmenten über ein ATM Netz wird bei diesem Ansatz das Token nicht über das Backbone-Netz übertragen. Jedes Segment verwaltet selbst ein Token, womit der Medienzugriff ausschließlich unter den Stationen des jeweiligen Segmentes geregelt wird. Dieser grundlegende Unterschied zieht eine Reihe von Implikationen nach sich. Das Zeitverhalten und die Parametrierung unterliegen hier darüber hinaus anderen Einflüssen als bei der transparenten Kopplung. Zugleich eröffnet diese Kopplungsvariante aber die Möglichkeiten zur Adressierung einer insgesamt größeren Anzahl Teilnehmer. Dadurch, daß nicht mehr alle Teilnehmer einem gemeinsamen System angehören, kann der Datenverkehr auf in sich geschlossene Segmente lokal begrenzt werden. Der Datenaustausch über Segmentgrenzen hinweg ist jedoch ebenso möglich.

Bei der Kopplung unabhängig operierender PROFIBUS-Segmente braucht wegen des nicht notwendigen Tokentransports zwischen den Segmenten auf spezifische Probleme, welche der Tokentransport durch das ATM-Netz mit sich bringt, keine Rücksicht genommen zu werden. Eventuelle Tokenverluste, hervorgerufen durch Zellenverluste, sind ausgeschlossen. Infolgedessen verringert sich die potentielle Gefahr von Systeminstabilitäten durch Tokenverlust. Auswirkungen eines Tokenverlusts sind auf das betroffene Segment begrenzt, beeinflussen aber dennoch die Nachrichtenzyklen, die aus entfernten Segmenten mit dem betroffenen Segment abgewickelt werden.

Zugleich ist bei diesem Kopplungsansatz jedoch zu beachten, daß eine Reihe ganz anderer Probleme durch die Eigenständigkeit der PROFIBUSse aufgeworfen werden. Der gravierendste Unterschied zur transparenten Kopplung ist, daß die Brücken hier aus der Sicht der PROFIBUS-Segmente nicht mehr transparent arbeiten, sondern als PROFIBUS-Teilnehmer angesehen werden müssen. Die zu einem PROFIBUS-Segment gehörende Brücke nimmt in dieser Kopplungsvariante am Token-Passing-Verfahren des PROFIBUS teil, dem sie angehört. Die Brücke wird aber dennoch nie direkt von den Teilnehmern adressiert. Die Adreßvergabe an die Brücke genügt lediglich den Zweck, am Token-Passing teilnehmen zu können.

Für den Transport eines Telegramms von dem lokalen zu einem entfernten Segment ändert sich in diesem Falle nur wenig. Gleichmaßen werden auch in diesem Ansatz die Telegramme als SDUs der AAL-Schicht übergeben. Anders verhält es sich beim Empfang eines Tele-

gramms über das ATM-Netz. Hier kann die Brücke das Telegramm nicht sofort auf den PROFIBUS aussenden, sondern sie muß warten, bis ihr die Sendeberechtigung erteilt wurde (Tokenerhalt). Im schlechtesten Falle, wenn die Brücke das Token gerade abgegeben hat, kann dies mehr als eine ganze Token-Umlaufzeit ausmachen.

Dieses Modell der PROFIBUS-Kopplung gestattet die Erweiterung der Leistungsfähigkeit von PROFIBUS und bringt die folgenden positiven Aspekte mit sich.

a) Lasttrennung

Segmente mit hoher Last können bei entsprechend geringem Vernetzungsgrad in Teilsegmente zerlegt werden. Dadurch verringert sich einerseits die Grundlast, die durch die Tokenzyklen verursacht wird, in den jeweiligen Teilsegmenten. Zugleich, wenn es nicht notwendig ist, daß jeder Teilnehmer alle Nachrichten erhalten muß, kann mittels Filterung die Last in den einzelnen Segmenten reduziert werden. Darüber hinaus wird eine Nebenläufigkeit in den verteilten Systemen durch die Verwaltung von jeweils einem Token pro Segment erreicht.

b) Zentrales Management mehrerer Segmente

Dieser Aspekt wird durch die Zusammenschaltung von sonst durch die Ausdehnungsbegrenzungen getrennten Segmenten (Inseln) erreicht. Zur Administration bzw. zur Überwachung können Teilnehmer aus einem Segment auf Teilnehmer in entfernten Segmenten bei Bedarf auch über weite Distanzen zugreifen.

c) Erhöhung der Anzahl der Teilnehmer durch erweiterte Adressierung

Der PROFIBUS-Standard gibt als Orientierung den Einsatz von maximal 32 aktiven Teilnehmern an. Insgesamt können pro Segment 127 Teilnehmer adressiert werden. Mittels einer Adreßerweiterung, die auf der Verwendung der im PROFIBUS-Standard vorgesehenen Segment-Adresse beruht, können theoretisch bis zu 64 Segmente zusammengeschaltet werden.

d) Erhöhte Ausdehnung

Wie beim Ansatz der transparenten Kopplung wird auch mittels dieser Kopplungsvariante durch das Backbone-Netz eine skalierbare Erhöhung der maximalen Ausdehnung zwischen zwei PROFIBUS-Teilnehmern erreicht.

Der Kopplungsansatz wartet neben den in a) bis d) genannten positiven Aspekten auch mit einer Reihe von Effekten auf, die teilweise typische Probleme bei der Zusammenschaltung von autarken Segmenten darstellen und nicht mit der Verwendung von ATM als Backbone-Netz in Zusammenhang gebracht werden können. Im folgenden wird darauf kurz Bezug genommen und in jeweils eigenen Kapiteln eingehend später diskutiert. Zu den Effekten gehört das Verhalten der Stationen bei der Nutzung unbestätigter Dienste in Bezug auf Fehlererkennung und -behandlung. Weiterhin sind die Reaktionszeiten bei Nachrichtenzyklen, die sich über Segmentgrenzen erstrecken, zu betrachten. Es ist die nahezu optimale Anzahl von Teilnehmern bei der Trennung von Segmenten zu ermitteln. Ferner sind die Rückwirkungen auf die Parametrierung der einzelnen Segmente und der Einfluß, den der segmentübergreifende Verkehr auf den jeweils lokalen ausübt, zu untersuchen. Es können, bedingt durch die nun bei einer solchen Kopplungsvariante vorhandene Nebenläufigkeit, Deadlock-Situationen auftreten. Auf Deadlock-Situationen sowie Möglichkeiten zu deren Vermeidung bzw. Auflösung wird in Abschnitt 5.5.2 explizit eingegangen. Den Ansätzen zur Vermeidung muß der Vorzug gegenüber solchen zur Auflösung von Deadlock-Situationen gegeben werden. Im wesentlichen ist hierbei das Verhalten von Anwendungsschicht und Sicherungsschicht in Bezug auf

die Bestätigung von Nachrichten zusammen mit der Loslösung vom Stop-and-Wait-Prinzip von Bedeutung.

5.2 Tokenverwaltung

Bei der Zusammenschaltung von autark operierenden PROFIBUSsen wird anders als bei der transparenten Kopplungsvariante niemals ein Token durch das ATM-Netz transportiert. Die Teilnehmer bilden innerhalb ihrer Segmente einen eigenen logischen Token-Ring aus. Alle Mechanismen der Tokenweitergabe, Regelungen zu möglichen Tokenübertragungswiederholungen sowie die Aufnahme neuer Teilnehmer in den logischen Token-Ring behalten ihre Funktion bei und laufen von der Kopplung gänzlich unberührt ab. Das Gesamtsystem wird durch Fehlersituationen in Verbindung mit dem Token in einzelnen Segmenten nur marginal beeinflusst, weil nur die Nachrichtenzyklen mit dem jeweiligen Segment betroffen sind. Lokal gesehen bleibt die Kommunikation in den nicht von Fehlfunktionen betroffenen Segmenten intakt. Das systembedingte Fehlen der Tokenübertragung durch das ATM-Netz schließt bei diesem Kopplungsansatz eine potentielle Fehlerquelle aus.

5.3 Aufgaben und Funktion der Brücken

Die Brücken sind bei der Kopplung von unabhängigen PROFIBUSsen mit wesentlich mehr Aufgaben betraut als bei der transparenten Kopplungsvariante. Neben den auszuführenden Filterfunktionen sind die Brücken Teilnehmer im logischen Token-Ring unter den aktiven Stationen. Das bedeutet zugleich, daß auf die Sendeberechtigung gewartet werden muß, wenn Telegramme aus entfernten Segmenten eingetroffen sind. Prinzipiell hat die Brücke den Status eines Masters in Bezug auf die Schicht 2 des PROFIBUS und kann selbst als aktiver Teilnehmer grundsätzlich auch mit einer PROFIBUS-Anwendungsschicht ausgestattet werden. Ohne Eingriff in das Token-Verwaltungsprotokoll erlangt die Brücke mit derselben Frequenz die Sendeberechtigung wie die anderen Master desselben Segmentes. Als Hauptaufgabe obliegt es den Brücken, anhand von Adreßtabellen die Filterfunktion auszuführen und andererseits aus entfernten Segmenten eintreffende Telegramme auf dem lokalen PROFIBUS auszusenden. Zusätzlich zu dem durch die Filtertabelle und die ATM-Verbindungen verursachten Administrationsaufwand können den Brücken auch Fehlererkennungs- und -behebungsfunktionen aufgetragen werden.

5.3.1 Architektur

Die Brücken zur Kopplung unabhängig operierender PROFIBUSse über ein ATM-Netz verfügen über je einen Anschluß an PROFIBUS und ATM. Im folgenden wird die Unterscheidung nach den Übertragungsrichtungen vorgenommen. Jedes PROFIBUS-Telegramm wird auf dem Bus mitgelesen und durchläuft die Brückenfunktions-Instanz (Abbildung 63). Token und lokal adressierte Telegramme werden verworfen. Telegramme für entfernte Segmente sind auf dem ATM-Interface auszugeben. Die Filterentscheidung wird anhand einer Filtertabelle vorgenommen. Über eine Management-Instanz wird diese Filtertabelle eingerichtet. Das Weiterleiten eines PROFIBUS-Telegramms in das ATM-Netz kann mit dem Aussenden einer Quittung (Bestätigung) an den Initiator im lokalen Segment verbunden werden.

Die Nebenläufigkeit der Prozesse in den einzelnen unabhängigen PROFIBUSsen macht es möglich, daß zeitgleich bei mehr als zwei zusammengeschalteten Segmenten aus jedem dieser Segmente ein Telegramm ankommen kann. Dies macht eine Pufferung dieser Telegramme,

die nicht sofort aufgrund des momentan fehlenden Zugriffsrechtes oder mangelnder Token-haltezeit weitergeleitet werden können, erforderlich.

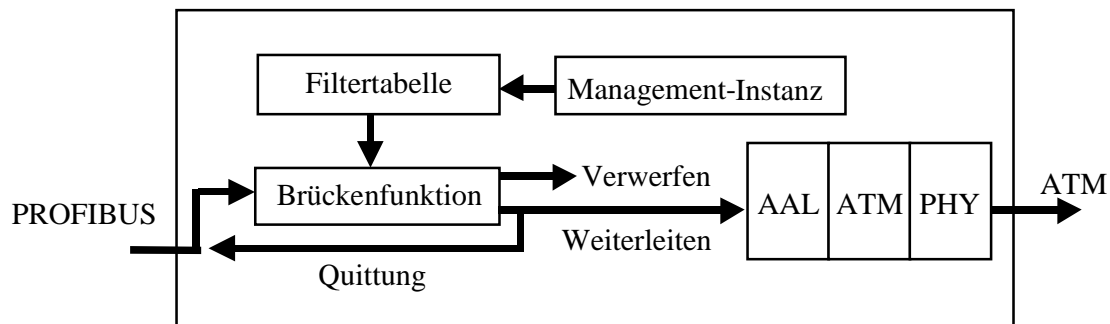


Abbildung 63: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Brücke mit Filterfunktion (1)

Abbildung 64 zeigt die involvierten Instanzen auf dem Weg vom ATM-Port zum PROFIBUS-Port. Die Warteschlange nimmt die PROFIBUS-Telegramme auf, die nicht sofort ausgesendet werden können. Ein vorhandener Scheduler verwaltet anhand von Prioritätsklassen, denen einzelne Telegramme zugeordnet werden können, die Warteschlange. Über die Management-Instanz wird der Scheduler parametrisiert. Diese Instanz ist geeignet, um Konzepte aus dem Standard 802.1p im Zusammenhang mit VLANs zu übernehmen.

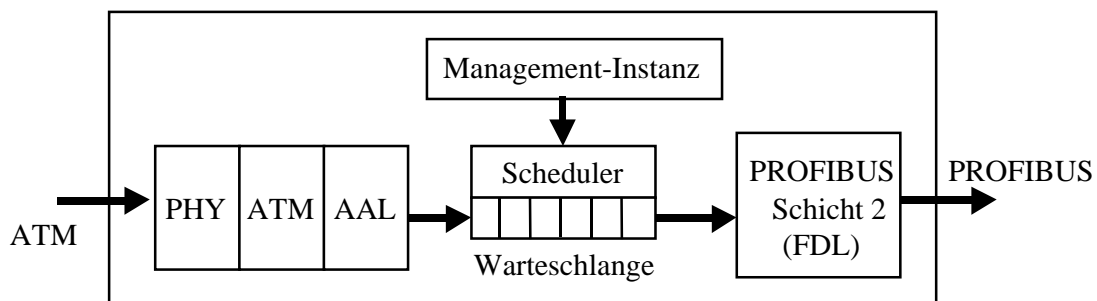


Abbildung 64: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Brücke mit Filterfunktion (2)

5.3.2 Filterung und Weiterleitung

Bei den Aufgaben zur Filterung und Weiterleitung müssen die beiden Richtungen PROFIBUS-ATM und umgekehrt ebenfalls getrennt betrachtet werden. Bevor der Datenaustausch über die ATM-Verbindungen stattfinden kann, müssen diese aufgebaut werden. Es kann bei dieser Kopplungsvariante ausreichen, die Verbindungen dynamisch zu etablieren, wenn der Datenaustausch nur sporadisch, etwa zu Verwaltungszwecken, erforderlich ist. In den meisten Fällen ist jedoch auch hier von einer einmaligen Etablierung und dem nachfolgend dauerhaften Bestehen der Verbindungen auszugehen. Stellt man die Dauer des Verbindungsaufbaus von 50 bis 150 ms pro Switch [Almu99] der anzustrebenden Dauer von Nach-

richtenzyklen im Bereich von wenigen Millisekunden insgesamt gegenüber, liegt der Schluß nahe, die Verbindungen nur einmalig zu etablieren und dann dauerhaft aufrecht zu erhalten.

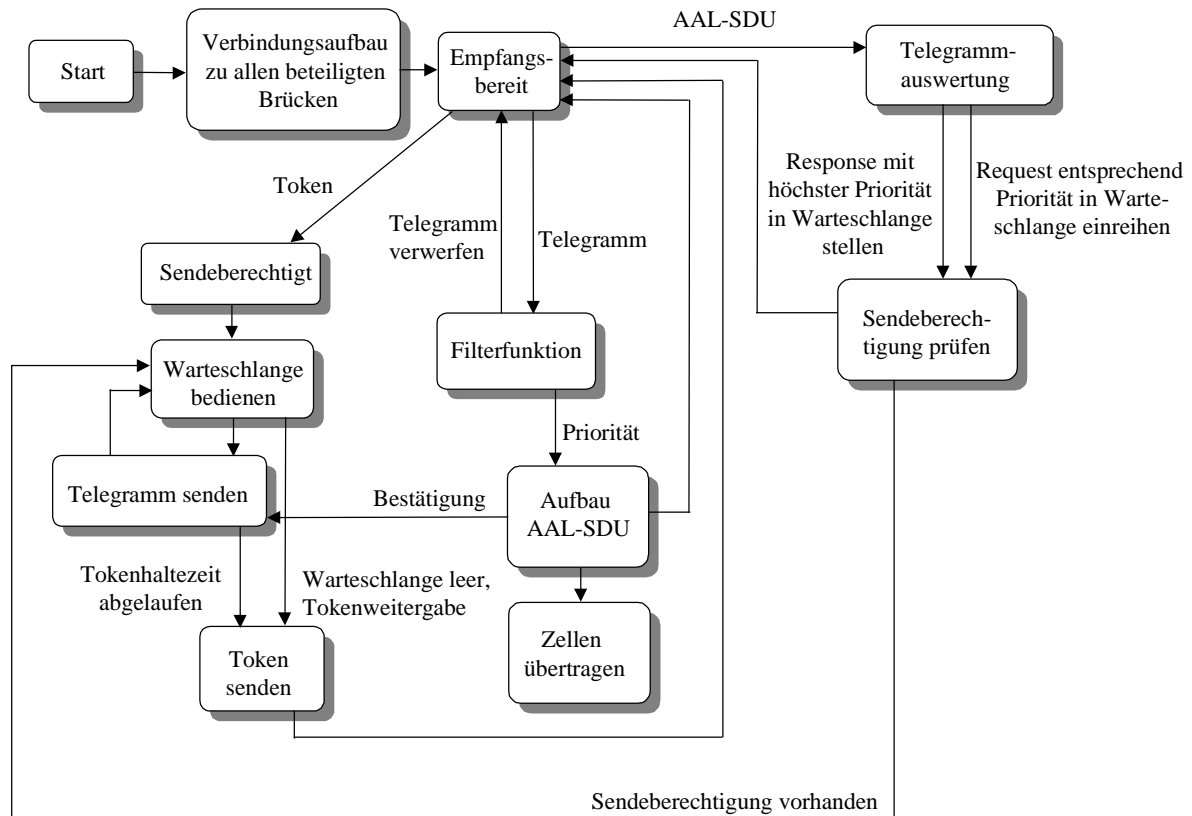


Abbildung 65: Automat einer Brücke mit Filterfunktion

Der Protokollautomat einer PROFIBUS-ATM-Brücke mit der Funktion zum Verbinden unabhängig operierender PROFIBUSse ist in Abbildung 65 wiedergegeben. Nach dem Aufbau der parametrisierten Verbindungen geht die Brücke in den Empfangszustand über. Nach dem Eintreffen eines Tokens kann die Brücke die Warteschlange bedienen. Eintreffende Telegramme auf dem PROFIBUS-Interface werden der Filterfunktion zugeführt und entsprechend verworfen oder zusammen mit einer Priorität als AAL-SDU der AAL-Schicht übergeben. Die dargestellte Brücke unterstützt das Senden von Bestätigungen an den lokalen Initiator zur Überwindung des Stop-and-Wait-Prinzips. Auf dem ATM-Interface eintreffende Zellen werden als AAL-SDUs einer Telegrammauswertung unterzogen. Dort wird bestimmt, ob das Telegramm eine Anforderung (Request) oder eine Antwort (Response) darstellt. Hiernach wird, sollte dies nötig sein, unterschiedlich bei der Einreihung in die Warteschlange verfahren. Bei vorhandener Sendeberechtigung kann die Brücke die Warteschlange sofort bedienen, anderenfalls kehrt sie in den Empfangszustand zurück.

Die Verbindungsverwaltung verwendet dieselben Funktionen wie eine transparente Brücke.

In Richtung PROFIBUS nach ATM nimmt die Brücke auf der Basis einer Adreßtabelle die Filterentscheidung vor. Die Tabelle kann entweder statisch eingestellt oder durch entsprechende Lernvorgänge aufgebaut werden. Weiterzuleitende Telegramme werden entsprechend dem Strom-Modus oder Block-Modus ausgesendet. Der zeitliche Unterschied zwischen

Strom-Modus und Block-Modus fällt bei dieser Kopplungsvariante durchschnittlich jedoch nur wenig ins Gewicht, da in der Regel nicht davon ausgegangen werden kann, daß ein Telegramm sofort von der oder den entfernten Brücken auf den PROFIBUS ausgesendet wird. Es sollte dennoch der Strom-Modus zur Verwendung den Vorzug erhalten.

ATM-seitig empfangene Telegramme werden folglich in der Regel in eine bereitstehende Warteschlange eingereiht werden müssen, da die Brücke nur bei Tokenbesitz sendeberechtigt ist. Hinzu kommt die Möglichkeit des gleichzeitigen Eintreffens von zwei oder mehr Telegrammen aus jeweils verschiedenen Segmenten. (Abbildung 66).

Nachfolgend wird ein Nachrichtenzyklus unter Beteiligung von Teilnehmern in zwei verschiedenen Segmenten entsprechend Abbildung 67 betrachtet. Der Initiator sendet sein Aufruftelegramm aus, die lokale Brücke überträgt das Telegramm auf der ATM-Verbindung bis zur entfernten Brücke. Diese sendet das Telegramm auf ihren lokal angeschlossenen PROFIBUS.

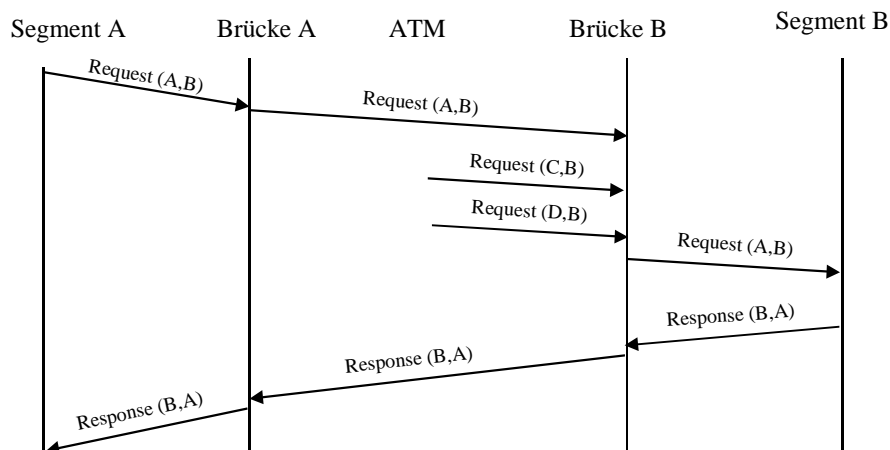


Abbildung 66: Eintreffen von Anforderungen aus verschiedenen Segmenten

Der angesprochene Teilnehmer generiert das Antworttelegramm, adressiert an den Initiator über die ATM-Verbindung. Dieses Antworttelegramm erreicht die Brücke des Segmentes, zu dem der Initiator gehört und kann von dieser sofort auf den PROFIBUS ausgesendet werden.

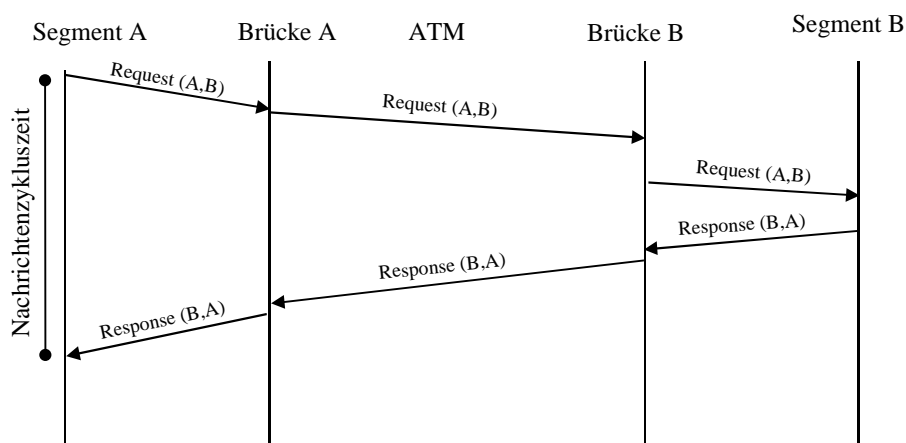


Abbildung 67: Sendeverhalten eines Masters nach Stop-and-Wait-Prinzip

Dies wird möglich, da der Initiator wegen des Stop-and-Wait-Prinzips in der Zwischenzeit zur Untätigkeit gezwungen war. Kein weiterer Datenverkehr fand während dieser Zeit auf dem PROFIBUS statt. Das Geschilderte trifft aber nur für bestätigte Dienste zu.

Bei unbestätigten Diensten beginnt der Master nach dem Verstreichen der Idle-Zeit mit einem weiteren Nachrichtenzyklus oder der Tokenweitergabe. Das Stop-and-Wait-Prinzip findet keine Anwendung. Hierdurch kann es dazu kommen, daß sich zur gleichen Zeit mehr als ein Telegramm aus einem Segment in der Warteschlange der betroffenen Brücke befinden kann.

5.3.3 Kommunikationsverhalten

Der Wegfall der Tokenübertragung auf den ATM-Verbindungen führt grundsätzlich zu einer Entlastung der ATM-Verbindungen gegenüber dem Konzept der transparenten Kopplung. Darüber hinaus werden nicht alle Telegramme aus den einzelnen Segmenten in die anderen Segmente transportiert. Die Anzahl der zu transportierenden Telegramme richtet sich nach dem Vernetzungsgrad der einzelnen Teilnehmer mit Teilnehmern in anderen Segmenten und der Nachrichtenfrequenz. Je intensivere Kommunikationsbeziehungen über Segmentgrenzen hinweg bestehen, um so größer ist das auf den ATM-Verbindungen zu transportierende Datenvolumen. Der burstartige Charakter des PROFIBUS-Datenverkehrs mit alternierenden Phasen des Wartens und des Sendens bleibt aber davon unberührt. Auch das Verlangen von PROFIBUS-Anwendungen, Nachrichten mit äquidistanten Abständen auszutauschen, bleibt bestehen.

Unverändert sind daher die Anforderungen an die vom ATM-Netz zu erbringende Dienstqualität. Ferner muß die potentiell zu erwartende Aufenthaltsdauer von Telegrammen in der Warteschlange der Brücken berücksichtigt werden. Rückwirkungen auf die Länge der Slot-Zeit sind einzukalkulieren.

Trifft bei Nutzung eines bestätigten Dienstes zu einem zuvor gesendeten Request die entsprechende Antwort vom entfernten Segment über den ATM-Port ein, so muß und kann die lokale Brücke die Antwort sofort nach Erhalt auf den angeschlossenen PROFIBUS aussenden, da der Requester auf diese wartet. Solange die Antwort noch nicht eingetroffen ist, verharrt der Requester im Wartezustand und es findet während dieser Zeit kein Datenverkehr auf dem Segment statt. Dadurch können auch keine Kollisionen im lokalen Segment auftreten, wenn die Brücke das Antwort-Telegramm aussendet. Andererseits können auch keine weiteren Nachrichtenzyklen während der Wartezeit abgewickelt werden. Die längeren Nachrichtenzyklen reduzieren den Gesamtdurchsatz des PROFIBUS und führen zu längeren Systemreaktionszeiten. Betroffen von den längeren Zykluszeiten sind im Gegensatz zum Konzept der transparenten Kopplung aber nur die Zyklen, die über Segmentgrenzen hinweg abgewickelt werden. So daß, vorausgesetzt der Intrasegmentverkehr nimmt den überwiegenden Teil der Kommunikation ein, sich die Auswirkungen in Grenzen halten. Dies geht auch einher mit der Feststellung, daß die Dauer von Tokenzyklen nicht von der Kopplung durch ATM betroffen ist.

5.3.4 Fehlererkennung und Fehlerbehebung

Fehlersituationen, die durch den Verlust von Token auf der ATM-Verbindung hervorgerufen werden, sind bei dieser Kopplungsvariante ausgeschlossen. Dadurch wird die Gefahr eines Systemzusammenbruchs durch dauerhaft gestörte Verbindungen eingedämmt. Dennoch birgt die Zwischenschaltung des ATM-Netzes die gleichen bereits diskutierten Risiken durch

Warteschlangenüberläufe in den Switchen für Zellverluste wie beim Ansatz der transparenten Kopplung.

Es wird nicht als sinnvoll erachtet, die Brücken mit Fehlererkennungs- und Sendewiederholmechanismen zu versehen und statt dessen bevorzugt auf die Wiederholmechanismen des PROFIBUS zurückzugreifen. Verluste einzelner Zellen, die zu einem längeren Telegramm gehören, können in den Brücken zwar bemerkt werden, es ist jedoch zeitlich kein signifikanter Vorteil zu erzielen, wenn von der sendenden Brücke eine Wiederholung der Zellen angefordert wird. Beim Initiator wird indes der Slot-Timer auslaufen und den Initiator veranlassen, das Telegramm neu auszusenden. In dem Falle, daß das Telegramm nur aus einer Zelle bestand, kann eine Wiederholungsanforderung von der entfernten Brücke ohnehin nicht ausgesendet werden, weil diese das Ausbleiben der Zelle nicht bemerken kann.

Bei der transparenten Kopplung werden grundsätzlich alle Telegramme den Teilnehmern in allen angeschlossenen Segmenten zugesendet. Dies hat den Effekt, daß leicht von Gesamtsystem bemerkt wird, ob Teilsegmente von der Kommunikation abgeschnitten sind. Bei der in diesem Kapitel betrachteten Kopplungsvariante werden die Telegramme unter Umständen nur selten segmentübergreifend ausgetauscht. Das kann dazu führen, daß Kommunikationsunterbrechungen erst spät bemerkt werden. Deshalb müssen die Brücken untereinander zyklisch Lebenszeichen mit allen zum Gesamtsystem gehörenden Brücken austauschen. Auf diese Weise werden fehlerbedingt oder absichtlich entfernte Segmente sowie auch neu hinzukommende Segmente erkannt.

5.4 Erweiterte Adressierung

Zur Zuordnung von einzelnen Teilnehmern zu Segmenten muß das konventionelle Adreßschema des PROFIBUS erweitert oder in einer definierten Weise angewendet werden.

Die erste Variante dazu gibt der PROFIBUS-Standard vor, wobei durch Adreßerweiterung zusätzlich zu den Stationsadressen auch Segmentadressen im Telegramm erscheinen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Vergabe von Adreßbereichen aus dem gegebenen Stationsadreßbereich an jedes Segment. Die Brücken kennen dann die jeweilige Zuordnung zwischen Adreßbereich und Segment.

5.4.1 Nutzung der PROFIBUS Adreßerweiterung

Der PROFIBUS-Standard sieht für die Nutzung von Segmentadressen die spezielle Verwendung der Quell- und Zieladreßbytes des Telegrammkopfes vor. Sind Bit 8 der Quelladresse und Bit 8 der Zieladresse gesetzt, dann werden die beiden ersten Bytes des Datenteils als Segmentadressen angesehen, von denen jeweils Bit 1 bis Bit 6 als Segmentadresse gelten.

Damit sind bis zu 64 Segmente adressierbar. Abbildung 68 zeigt die Bildung der Adreßerweiterung entsprechend dem PROFIBUS-Standard. Token und Kurzquittung können nicht mit Adreßerweiterungen versehen werden. Beim Token erübrigt sich dies, weil es ohnehin nicht über die Segmentgrenze hinaus übertragen wird. Sollen Kurzquittungen in andere Segmente transportiert werden, müssen diese in spezielle Telegramme mit kompletten Adreßinformationen eingepackt werden.

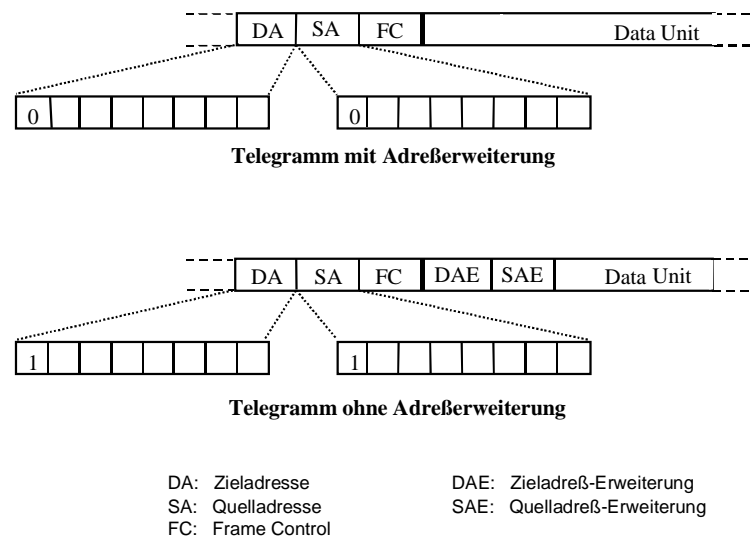


Abbildung 68: PROFIBUS Adreßerweiterung zur Vergabe von Segmentadressen

5.4.2 Segmentierung unter Verwendung von Adreßbereichen

Zur Aufrechterhaltung der Kompatibilität und für Geräte, die nicht mit Fähigkeiten der erweiterten Adressierung ausgestattet sind, kann ein Adreßschema entsprechend der folgenden Vorgehensweise verwendet werden. Es ist aber zu berücksichtigen, daß sich bei Einsatz des Schemas die Anzahl anzuschließender Teilnehmer nicht erhöht. Gemäß dem Schema wird der gesamte Adreßraum von 127 Adressen in Teilbereiche zerlegt. Die einzelnen Bereiche werden dann den jeweiligen Segmenten zugeordnet. Die Brücken kennen die Zuordnung der Adreßbereiche zu den einzelnen Segmenten und nehmen dementsprechend die Filterung vor. Zur Sicherung des nachträglichen Hinzufügens von Teilnehmern sind die Adreßbereiche hinreichend groß zu dimensionieren. Diese Variante ist durch einfache Verwaltung der Adreßbereiche in den Brücken und durch leicht verständliche Semantik der Zuordnung von Teilnehmern zu Segmenten gekennzeichnet (Abbildung 69).

Eine andere Variante ist die wahllose Verteilung der Adressen auf die Teilnehmer der einzelnen Segmente. Adressen dürfen jedoch nicht doppelt vergeben werden. Den Brücken muß für die Filterentscheidung zuvor für jede Adresse bekanntgemacht werden, zu welchem Segment diese gehört. Damit verlängern sich die Filtertabellen in den Brücken, da es für jeden Teilnehmer einen Eintrag geben muß. Es ist offensichtlich, daß auch durch dieses Verfahren der Adreßraum nicht größer wird. Weiterhin ist zu bedenken, daß durch die Verfahren der Adreßvergabe, die nicht auf der Adreßerweiterung beruhen, die Systemreaktionszeit in Abhängigkeit vom GAP-Faktor, wie im folgenden beschrieben, verlängert wird. Bei der Aufteilung des Adreßraumes auf mehrere Segmente nimmt der Token-Passing-Mechanismus im GAP-Modus nur die Stationen in seinem lokalen Segment wahr. Ausgenommen von der GAP-Abfrage sind die Adressen zwischen der parametrierten Highest Station Address (HSA) und 127. Im Segment D in Abbildung 69 liegen die Adressen zwischen 31 und 40. Die HSA ist 40. Dies hat zur Folge, daß der aktive Teilnehmer mit Adresse 40 den Bereich zwischen 0 und 30 durch GAP-Abfragen testen muß, obwohl das von vorn herein nicht erfolgreich sein kann. Im Segment A hingegen ist die HSA mit 10 festgelegt und der aktive Teilnehmer mit Adresse 10 braucht keine unnötigen GAP-Abfragen zu initiieren.

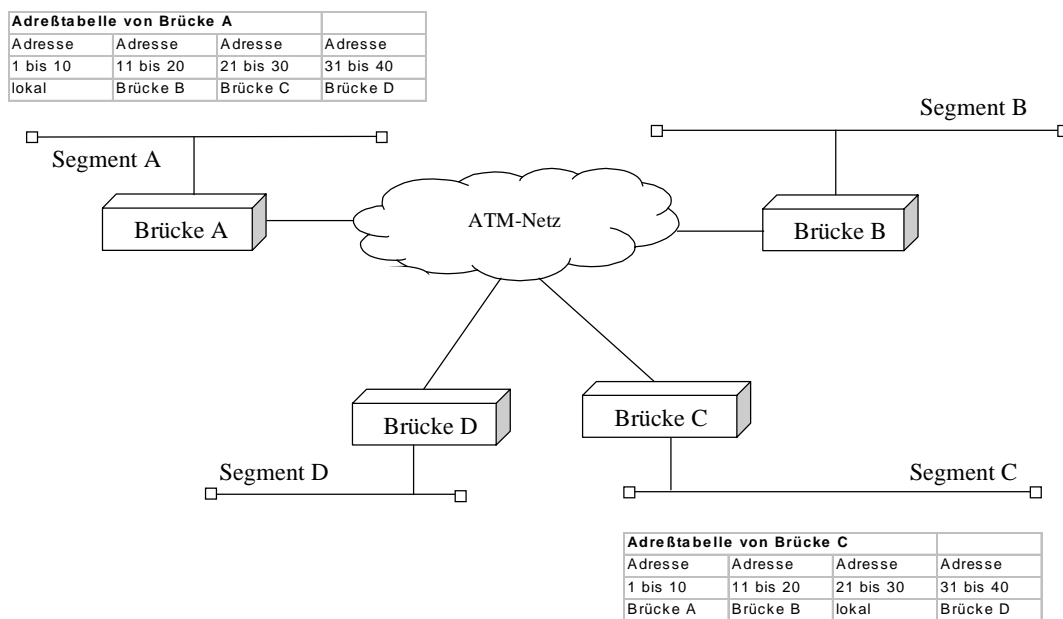


Abbildung 69: Zuordnung von Adreßbereichen zu Segmenten

Vergleich der beiden Methoden der Adreßvergabe

Hinsichtlich der Anzahl adressierbarer Teilnehmer ermöglicht die Nutzung der Adreßerweiterung theoretisch 64 Segmente mit jeweils bis zu 127 Teilnehmern zu adressieren. Die Zuordnung von Adreßbereichen aus dem Adreßraum von 127 Teilnehmeradressen zu einzelnen Segmenten hingegen gestattet nicht, mehr Teilnehmer als in einem konventionellen PROFIBUS anzuschließen und bringt der Nachteil der unnötig auszuführenden GAP-Abfragen mit sich.

Die Flexibilität der Adressierung ist bei der Verwendung der Adreßerweiterung wesentlich höher bei gleicher Komplexität der Filtermechanismen in den Brücken. Die Anmeldung oder Abmeldung einzelner Segmente aus dem Verbund ist ebenfalls einfacher bei der Nutzung der Adreßerweiterung. Der Einsatz der Adreßerweiterung des PROFIBUS verlangt jedoch von allen Teilnehmern, jedes Datentelegramm mit der Adreßerweiterung zu versehen. Ein Mischbetrieb beider Verfahren ist unzulässig. Das bedeutet, daß alle Geräte dahingehend kompatibel zu gestalten sind.

5.5 Auswirkungen der Kopplung auf das Systemverhalten

Die Kopplung von unabhängig operierenden PROFIBUS-Segmenten zieht eine Reihe von Konsequenzen nach sich. Einige davon, wie z. B. die längeren Zykluszeiten und eine höhere Fehleranfälligkeit bedingt durch die Übertragung auf den ATM-Verbindungen stehen in direktem Zusammenhang mit dem zur Verbindung der PROFIBUS-Segmente eingesetzten ATM-Netz. Eine Reihe weitere Konsequenzen ergeben sich aus den signifikanten PROFIBUS-Eigenschaften, wie dem Stop-and-Wait-Prinzip in Verbindung mit der Fehlererkennung und den Übertragungswiederholungen. Grundsätzlich lassen sich für die Übertragung der Telegramme in Zellen durch ein ATM-Netz die im Kapitel 4 zur transparenten Kopplung getroffenen Feststellungen auch auf diesen Kopplungsansatz übertragen. Die cha-

rakteristischen Eigenschaften dieses Konzeptes, welche nicht auf ATM zurückzuführen sind, stehen im Mittelpunkt der Diskussion in den folgenden Unterabschnitten.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Problemen und deren Lösungsansätzen im Zusammenhang mit der Aufrechterhaltung der Echtzeitanforderungen.

5.5.1 Echtzeitverhalten

Die Auswirkungen auf das Echtzeitverhalten und die Wahrung der Fähigkeit, Nachrichtenzyklen mit harten Zeitanforderungen abzuwickeln, hängen von einer Reihe Faktoren ab. Diese Faktoren werden im folgenden auf ihre Bedeutung im Zusammenhang mit der Minderung der Echtzeitfähigkeit untersucht und entsprechend gewichtet. Gleichzeitig werden Möglichkeiten zur Kompensation der nachteiligen Auswirkungen eingeführt.

Priorisierung der Brücken

Beim Token-Passing Verfahren erlangen die konkurrierenden Stationen gleichberechtigt in statistisch gleichen Zeitabständen die Sendeberechtigung. Nehmen die Stationen ihre Anspruch auf Sendezeit nicht wahr, geben sie unverzüglich das Token weiter. Eine Station, die zuvor gezwungen war, aufgrund fehlender Tokenhaltezeit nicht alle anstehenden Zyklen abzuwickeln, muß bis zum nächsten Tokenerhalt warten. Für die Brücken ist dies in Situationen hoher Last kein befriedigendes Verfahren.

Verhältnis Last der Brücke zur Gesamtlast der anderen Teilnehmer	Anzahl Adressen der Brücke	Maximale Re- aktionszeit der Brücke [ms]	Durch- schnittliche Reaktions- zeit der Brücke [ms]	Maximale Reaktionszeit der anderen Teilnehmer [ms]	Durchschnitt- liche Reaktions- zeit der anderen Teilnehmer [ms]
1:5	1	10,85	4,09	9,40	3,55
	2	7,13	2,95	11,20	3,91
	3	5,43	2,46	10,11	4,18
1:1	1	9,60	2,73	7,86	3,20
	2	7,16	2,09	10,14	3,63
	3	5,38	1,83	10,11	4,18
5:1	1	9,81	2,46	11,28	3,94
	2	7,16	1,94	12,14	4,57
	3	5,44	1,72	13,09	4,71

Tabelle 10: Reaktionszeiten der Nachrichten bei Priorisierung der Brücke

Satt dessen muß es möglich sein, unter minimaler Beeinflussung der anderen lokalen Teilnehmer die Brücken beim Token-Passing zu priorisieren. Eine Möglichkeit dazu ist die Vergabe von mehr als einer Stationsadresse an die Brücken. Prinzipiell bleibt das Master-Verhalten der Brücke aus der Sicht der anderen Teilnehmer gleich. Für sie stellt sich die Brücke wie zwei oder mehr Teilnehmer dar, die alle am Token-Passing partizipieren. Auf diese Weise erhält die Brücke bevorzugt häufiger das Senderecht. Erlangt die Brücke das Token und hat keinen Sendewunsch, ist dadurch nur ein Overhead von einem Token-

Weitergabezyklus entstanden. Nimmt die Brücke aber ihre Senderechte uneingeschränkt wahr, werden die anstehenden Nachrichtenzyklen der anderen lokalen Teilnehmer verzögert. Simulationen, deren Ergebnisse in Tabelle 10 dargestellt sind, haben diesbezüglich gezeigt, daß bereits die Vergabe einer zweiten Adresse an die Brücken zu signifikanten Verkürzungen der Reaktionszeiten durch kürzeren Aufenthalt von Telegrammen in der Warteschlange der Brücke führt.

Gegenstand der Simulationen war ein PROFIBUS-System mit 5 Teilnehmern und einer Brücke. Jeder Teilnehmer hat zyklisch hochpriorie Kommunikationswünsche. Die Brücke empfängt ebenfalls zyklisch hochpriorie Telegramme aus entfernten Segmenten. In Tabelle 10 sind drei verschiedene Lastverhältnisse zwischen der Brücke und der Summe der Kommunikationswünsche der anderen Teilnehmer angegeben. Die Token-Soll-Umlaufzeit wurde bei allen Simulationen mit 200 ms angesetzt. Der Brücke wurden jeweils eine, zwei oder drei Adressen gleichverteilt auf den Adreßraum zugewiesen. Ziel der Simulationen war es, den Einfluß der Priorisierung der Brücke gegenüber den anderen Teilnehmern beim Token-Passing zu ermitteln. Die Messung der Reaktionszeit begann bei Eintreffen der Anforderung aus Schicht 7 in der Warteschlange der Teilnehmer und der Telegramme aus entfernten Segmenten bei der Brücke und endete mit dem Eintreffen des Antworttelegramms. Bei allen drei Lastverhältnissen ist die deutliche Abnahme sowohl der maximalen als auch der durchschnittlichen Reaktionszeit der Brückentelegramme mit der zunehmenden Priorisierung der Brücke ersichtlich. Die Reaktionszeit für die Telegramme der anderen Teilnehmer nimmt im Gegensatz dazu bei allen drei Lastsituationen im Durchschnitt nur leicht zu und zeigt auch bei den maximalen Werten keine dramatischen Zuwächse. Der positive Effekt für die Reaktionszeit der Telegramme der Brücke bei gleichzeitig nur geringer Benachteiligung der anderen Teilnehmer rechtfertigt somit die Vergabe mehrerer Adressen an die Brücke zum Zwecke der Priorisierung dieser im Token-Passing-Verfahren.

Stop-and-Wait-Prinzip

Die Beibehaltung des für die PROFIBUS-Kommunikation in Schicht 7 typischen Stop-and-Wait-Prinzips führt bei der Kopplung von unabhängig operierenden PROFIBUSsen dazu, daß eine obere Schranke für die Dauer von Nachrichtenzyklen nicht exakt ermittelbar ist. Diese ist jedoch Voraussetzung für die Einstellung der Slot-Zeit und geht im übrigen in die Berechnung der Token-Soll-Umlaufzeit ein. Wegen fehlender Kenntnis über Systemzustände in den entfernten Segmenten, hervorgerufen durch die Nebenläufigkeit, lassen sich Zykluszeiten nur noch bedingt vorhersagen, z.B. bei priorisierten Nachrichten.

Es ist demzufolge eine Abkehr vom Stop-and-Wait-Prinzip bzw. eine Abkopplung der Anwendungsschicht von der Schicht 2 des PROFIBUS vorzunehmen.

Dies kann durch ein Protokoll mit einem zeitlichen Ablauf entsprechend Abbildung 70 realisiert werden. Der Initiator eines Nachrichtenzyklus erhält von der lokalen, wie in Abbildung 70, oder der entfernten Brücke eine Bestätigung über die erfolgreiche Übertragung des Requests, wenn diese den Request nicht sofort aussenden kann. Der Erhalt der Bestätigung veranlaßt den Master, diesen Nachrichtenzyklus als abgewickelt zu betrachten, obwohl er keinen direkten Kontakt mit dem Responder hatte. Dadurch wird aber erreicht, daß der Initiator weitere Nachrichtenzyklen (Request lokal) lokal oder segmentübergreifend beginnen bzw. abwickeln kann. Somit kann Datenaustausch lokal oder segmentübergreifend stattfinden. Die entsprechende Antwort vom Responder im entfernten Segment erreicht den Initiator danach unabhängig von den anderen Nachrichtenzyklen.

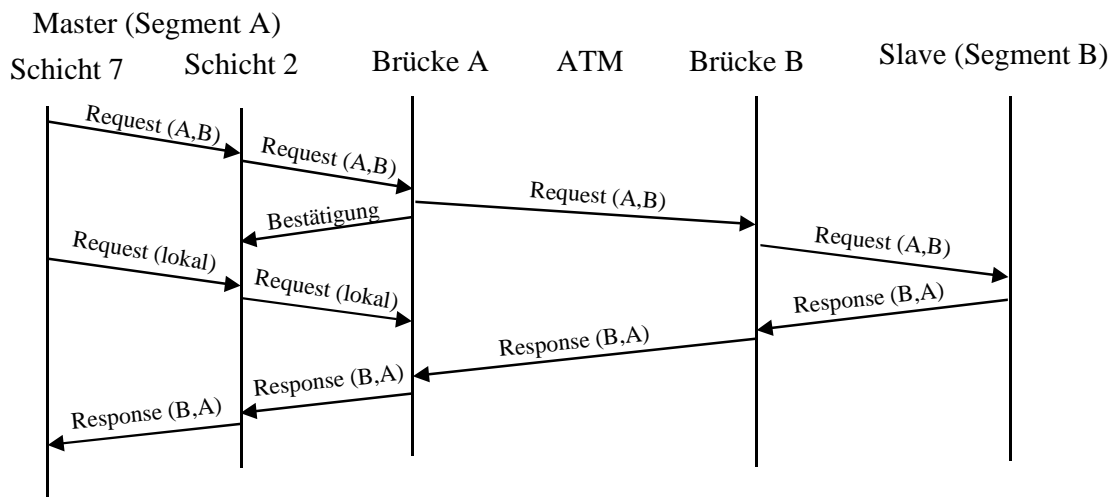


Abbildung 70: Brücke schickt Bestätigung an den Initiator

Die Anwendung muß unsensibel gegenüber diesem veränderten Kommunikationsablauf sein, d.h. nicht auf die unmittelbare Reaktion des Responders warten. Durch das Eintreffen der Bestätigung von der lokalen oder entfernten Brücke ist aber der Fehlerüberwachungsmechanismus (Slot-Timer) für bestätigte Dienste außer Kraft gesetzt. Hiernach ist auf entsprechende Mechanismen in der Anwendungsschicht zurückzugreifen.

5.5.2 Deadlock-Situationen

Ein gravierendes Problem, das auch mit dem Stop-and-Wait-Prinzip zusammenhängt, sind die möglicherweise auftretenden Deadlock-Situationen bei gleichzeitigen gegenseitigen Diensten. Befindet sich ein Request aus einem Segment auf dem Weg in ein anderes Segment, so wartet der initiiierende Master auf die Antwort. Es findet in dem Segment solange kein weiterer Datenverkehr statt. Das Token wird nicht weitergegeben.

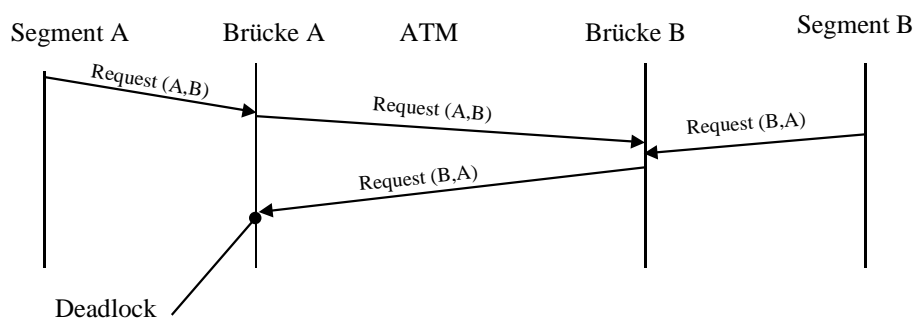


Abbildung 71: Entstehen einer Deadlock-Situation

Tritt nun beispielsweise gleichzeitig ein Request aus dem Zielsegment des ersten Requests zu dem Ursprungssegment auf, so warten beide Master vergeblich auf eine Antwort (Abbildung 71). Eine solche Situation muß entweder ganz vermieden oder ein Auflösungsalgorithmus dafür muß entwickelt werden. Die Brücken sind der Ansatzpunkt dazu.

Deadlock-Situationen treten dann nicht auf, wenn sich die Initiatoren von segmentübergreifenden Nachrichtenzyklen nur in einem Segment befinden und aus den anderen Segmenten keine Nachrichtenzyklen angestoßen werden.

5.5.2.1 Vermeidung von Deadlock-Situationen

Die Prävention gegen Deadlock-Situationen hat Vorrang vor der Erkennung und Behebung. Um vorbeugend gegen Deadlocks erfolgreich zu sein, bedarf es der Analyse des Zustandekommens solcher Situationen. Diese treten genau dann auf, wenn vor dem Ende eines Nachrichtenzyklus, an dem Teilnehmer in verschiedenen Segmenten beteiligt sind, eine Anforderung aus dem Segment des Responders in das Segment des Initiators gesendet wird.

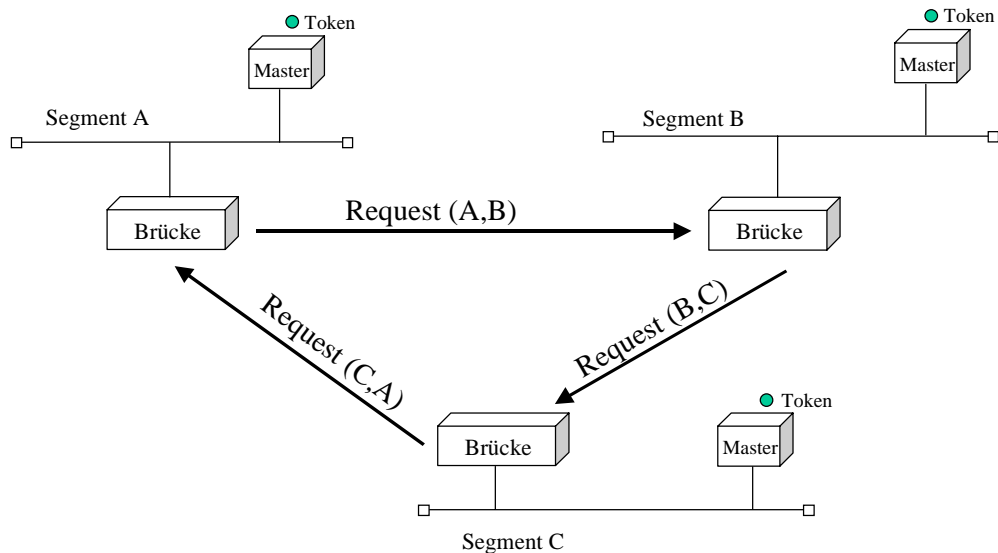


Abbildung 72: Zyklische Deadlock-Situation

In eine Deadlock-Situation können auch mehr als zwei Segmente verwickelt sein, wenn die noch unbestätigten Anforderungen zyklisch vorliegen. In Abbildung 72 ist dies beispielsweise für drei beteiligte Segmente dargestellt. Schlimmstenfalls sind alle angeschlossenen Segmente an der Blockierung beteiligt.

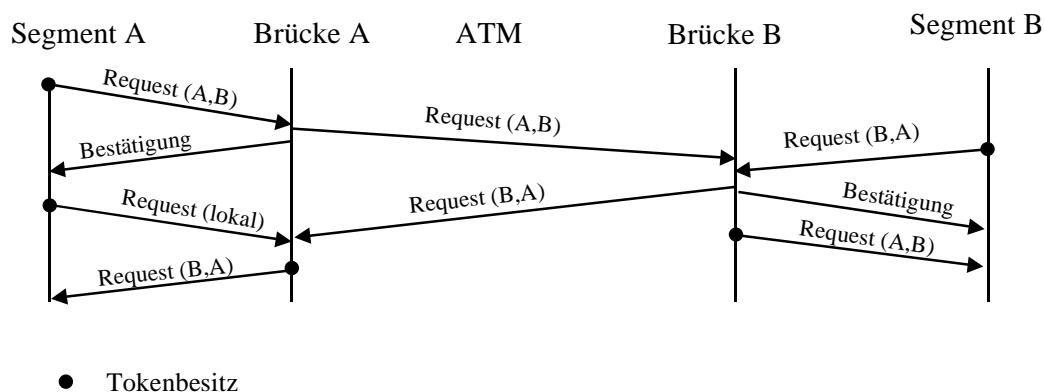


Abbildung 73: Vermeidung von Deadlock-Situationen (1)

Zur Prophylaxe gegen jene Situationen werden zwei Vorgehensweisen verfolgt. Die erste Variante geht davon aus, daß die jeweils lokale Brücke dem Initiator eine Quittung über das Absenden des Telegramms schickt und das Stop-and-Wait-Prinzip innerhalb der Schicht 2

damit überwunden wird (Abbildung 73). Auf der Anwendungsschicht bleibt die Ende-zu-Ende-Semantik jedoch erhalten.

Bei der zweiten Variante ermittelt die Brücke, ob sie in ihrer Warteschlange einen noch nicht ausgesendeten Request aus dem Segment vorliegen hat, in das das Anforderungstelegramm gesendet werden soll. In Abbildung 74 geschieht dies zum Zeitpunkt t . Ist dies der Fall, dann sendet die Brücke dem lokalen Initiator eine Bestätigung auf sein Telegramm und gibt gleichzeitig den lokalen Request auf der ATM-Verbindung an die Brücke des adressierten Segments weiter. Die Reihenfolge der Requests innerhalb der Brücke bleibt unverändert. Anschließend kann die Brücke nach Tokenerhalt den Request aus dem entfernten Segment aussenden.

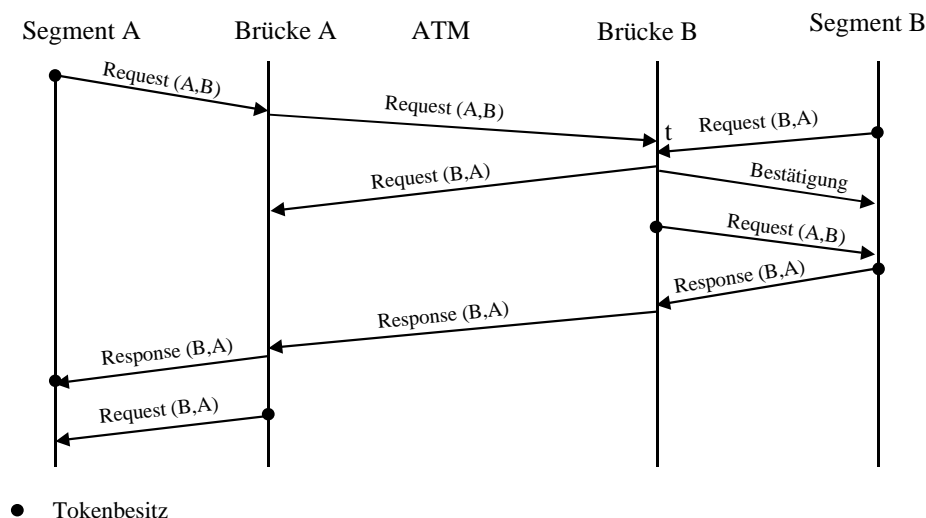


Abbildung 74: Vermeidung von Deadlock-Situationen (2)

Die hierauf folgende Response nimmt den Weg über die ATM-Verbindung zur entfernten Brücke, wo diese noch vor dem bereits eingetroffenen Request ausgesendet werden muß. Der Initiator im entfernten Segment erwartet die Response. Zum Aussenden der Response muß der Tokenerhalt nicht abgewartet werden. Erst beim nächsten Tokenerhalt kann die entfernte Brücke den Request der lokalen Masters, der bereits bestätigt wurde, in das entfernte Segment aussenden.

Prozeßabbilder in den Brücken

Eine weitere Idee, Deadlock-Zustände nicht entstehen zu lassen, ist mit dem Vorhalten von Prozeßabbildern in den jeweiligen Brücken verbunden. Die Brücke weiß, welche Stationen, welche Variablen usw. von welchen Stationen aus entfernten Segmenten angesprochen werden. In einem System mit wenigen Segmenten und wenigen Stationen ist dies eine überschaubare Lösung. Die Stationen aus den entfernten Segmenten unterhalten sich nicht mit den eigentlichen Adressaten, sondern kommunizieren lediglich mit ihren lokalen Brücken. Die Brücken bilden damit Proxy-Devices und treten an die Stelle der Endstationen. Durch schnelle Kommunikation tauschen die Brücken untereinander die Informationen aus, so daß Prozeßabbilder aktuell sind.

Bei der Verwendung von Prozeßabbildern kann nicht mehr auf die Fehlerkontrollmechanismen des PROFIBUS zurückgegriffen werden. Statt dessen muß zwischen den Brücken eine Fehlerüberwachung auch zur Absicherung gegen Zellverluste vorgenommen werden. Nachteilig kann sich die hier asynchrone Kommunikation zwischen den PROFIBUS-Teilnehmern

In weiteren denkbaren Fällen können Requests in andere Segmente noch anstehen, die schlimmstenfalls dann ringförmig zu einer Deadlock-Situation führen können, wie in Abbildung 72 gezeigt. Beim Entwurf der Anwendung ist daher großer Wert auf die genaue Analyse der Kommunikationsverbindungen zu legen um das potentielle Eintreten solcher zyklischen Deadlock-Situationen im Vorfeld zu erkennen.

5.5.3 Auswirkungen auf die Systemzeiten

Token-Zykluszeiten werden durch die Kopplung von eigenständig operierenden PROFIBUS-Segmenten nicht beeinflusst, da sich Token nur innerhalb der Segmentgrenzen bewegen. Ebenso unterliegt die Dauer der Nachrichtenzyklen zweier lokaler Teilnehmer untereinander keinen negativen Einflüssen. Die Dauer von Nachrichtenzyklen mit Teilnehmern in entfernten Segmenten wird aber signifikant durch die Lastsituation im ATM-Netz und den Zeitpunkt des Erhalts der Sendeberechtigung der entfernten Brücke sowie deren Warteschlangenfüllstand bestimmt. Eine weitere bestimmende Rolle auf die Reaktionszeit übt die Gesamtlast in den jeweils entfernten Segmenten aus.

Bei der Nutzung des unbestätigten Dienstes ergeben sich für den Initiator keine zeitlichen Konsequenzen. Gleiches gilt für die vorgestellte Methodik, das Stop-and-Wait-Prinzip des PROFIBUS durch die Sendung einer Bestätigung durch die lokale Brücke zu überwinden. Wird bei demselben Verfahren die Bestätigung durch die entfernte Brücke gesendet, so verlängert sich der Nachrichtenzyklus um die Transferzeiten durch das ATM-Netz.

5.5.4 Parametrierung

Das sich auf den ersten Blick durch den Wegfall der Tokenübertragung zu vereinfachen scheinende Verfahren stellt sich bei näherer Betrachtung als wesentlich komplexer in Bezug auf die Erfüllung von Zeitanforderungen heraus. Bei geforderter strenger Konformität zum PROFIBUS-Standard ist hier das Auftreten eines nichtdeterministischen Kommunikationsverhaltens wahrscheinlich, welches in der Nebenläufigkeit begründet liegt und auch nicht durch eine optimale Parametrierung vermieden werden kann. Bei der Definition der Systemparameter wird bei PROFIBUS im fehlerlosen Falle von einer theoretisch längsten Übertragungsdauer, bzw. Nachrichten-Zykluszeit ausgegangen. Eine solche obere Schranke für die Nachrichten-Zykluszeit in einem in dieser Art gekoppelten System zu bestimmen ist äußerst schwierig. Grundsätzlich können die einzelnen Segmente verschiedene auf die jeweiligen Verhältnisse optimierte Parametersätze verwenden.

Bei der Loslösung vom Stop-and-Wait-Prinzip durch Versenden von Bestätigungen von den Brücken kann die Slot-Zeit jedoch entsprechend den lokalen Verhältnissen gewählt werden, da die Nachrichtenzyklen sich nicht verlängern. Der Einfluß der Kopplung bleibt auf die Reaktionszeit beschränkt.

a) Token-Zykluszeit

Tokenzykluszeiten erfahren bei der Kopplung von unabhängigen PROFIBUS-Segmenten über ein ATM-Netz keine Verlängerung, da Token nie das lokale Segment verlassen.

b) Nachrichten-Zykluszeit

Bei der Betrachtung der Auswirkungen der Kopplung auf die Nachrichtenzykluszeit ist zwischen den lokalen Zyklen und denen mit Teilnehmern in entfernten Segmenten zu unterschei-

den, wenn das Stop-and-Wait-Prinzip beibehalten wird. Für die Nachrichtenzykluszeiten bezogen auf die Schicht 2 ergeben sich Werte entsprechend (9) und (10).

$$(9) \quad T_{MC} = T_{S/R} + T_{SDR} + T_{A/R} + T_{ID} + 2 \cdot T_{TD} + 4 \cdot T_{SDB} + 2 \cdot T_{TDA} + T_{S/R} + T_{A/R} + T_{WSR}$$

T_{WSR} : Aufenthaltsdauer in der Warteschlange der entfernten Brücke

Für die Aufenthaltsdauer eines Telegramms in der Warteschlange der Brücke kann lediglich bei priorisierten Telegrammen eine obere Schranke angegeben werden.

Als Ergebnis des Loslösens vom Stop-and-Wait-Prinzip ergibt sich die Länge eines Nachrichtenzyklus aus (10).

Entsprechend (10) erhöht sich die Dauer eines Nachrichtenzyklus noch einmal um die Länge des Aufenthaltes des Antwort-Telegramms in der Warteschlange der lokalen Brücke, beim Warten auf die Sendeberechtigung.

$$(10) \quad T_{MC} = T_{S/R} + T_{SDR} + T_{A/R} + T_{ID} + 2 \cdot T_{TD} + 4 \cdot T_{SDB} + 2 \cdot T_{TDA} + T_{S/R} + T_{A/R} + T_{WSR} + T_{WSL}$$

T_{WSL} : Aufenthaltsdauer des Antwort-Telegramms in der lokalen Brücke

Hierfür kann eine obere Schranke ermittelt werden, weil Antworttelegramme aus entfernten Segmenten gegenüber Anforderungstelegrammen aus entfernten Segmenten von den Brücken mit höchster Priorität beim Aussenden auf den PROFIBUS bedient werden.

c) Token-Soll-Umlaufzeit

Die Token-Soll-Umlaufzeit muß bei Beibehaltung des Stop-and-Wait-Prinzips die verlängerten Zykluszeiten zu den entfernten Segmenten berücksichtigen. Grundsätzlich sind jedoch in die Berechnung der Token-Soll-Umlaufzeit auch die Häufigkeit und die Dauer von Zyklen einzubeziehen, die von anderen Segmenten an Stationen im lokalen Segment gerichtet sind. Dies ist in der Entwurfsphase der Gesamtanlage vorzunehmen.

d) Überwachungszeiten

Slot-Zeit

Bei Beibehaltung des Stop-and-Wait-Prinzips ist eine großzügige Einstellung der Slot-Zeit vorzunehmen. Eine zu kurz gewählte Slot-Zeit läßt den Datenverkehr im betreffenden Segment kollabieren.

Wird jedoch das Stop-and-Wait-Prinzip durch den Versand von Quittungen durch die lokale Brücke überwunden, kann die Länge der Slot-Zeit wie im konventionellen PROFIBUS eingestellt werden.

Aus-Zeit

Der Hauptbestandteil der Aus-Zeit wird durch die Slot-Zeit bestimmt. Die für die Slot-Zeit getroffenen Aussagen treffen damit indirekt auch für die Aus-Zeit zu.

e) unbestätigter Dienst

Bei der Abwicklung von unbestätigten Diensten ergibt sich in Bezug auf die Kommunikationsabläufe kein Unterschied zum konventionellen PROFIBUS. Die potentiell längere Zeit-

spanne vom Aussenden des Telegramms bis zu dessen Eintreffen beim Empfänger im entfernten Segment ist jedoch für den Anwendungskontext von Relevanz.

Für PROFIBUS-Anwendungen, die sich unmittelbar nach Aussendung ihres Requests mit einer Bestätigung durch die lokale Schicht 2 zufriedengeben und keine strengen Anforderungen an die schnellstmögliche Rückantwort von der adressierten Station stellen, ist die vorgeschlagene Abkehr von Stop-and-Wait-Prinzip in diesem Kopplungsansatz geeignet. Die zugleich damit verbundene Verlängerung der Antwortzeiten muß ebenfalls von diesen Anwendungen toleriert werden können. Die Anwendungsschicht zeigt in diesen Fällen ein asynchrones Verhalten zu den Kommunikationsschichten. Werden aber von der Anwendung garantierte Antwortzeiten verlangt, ist der vorgeschlagene Ansatz zur Kopplung von unabhängig operierenden PROFIBUSsen nicht ohne Änderungen des PROFIBUS anwendbar.

Eine Umgehung und Überwindung der angedeuteten Problematik verlangt in einigen Punkten das Loslösen vom PROFIBUS-Standard, das durch die Priorisierung der Brücken, die Priorisierung der Nachrichten aus einzelnen Segmenten und die Abkehr vom Stop-and-Wait-Prinzip zu erreichen ist und sich zugleich vereinfachend auf die in diesem Kopplungskonzept wesentlich komplexere Parametrierung auswirkt.

5.5.5 Geeignete Segmentierung von PROFIBUS

Bei der Wahl der geeigneten Segmentgröße spielen verschiedene Kriterien mit differenzierter Gewichtung eine Rolle. Mit der Anwendung der erweiterten Adressierung steigert sich die Anzahl potentiell anschließbarer Teilnehmer an das Gesamtsystem. Die Anzahl der dedizierten Segmente ist auf 64 begrenzt. Ausschlaggebendes Kriterium zur Implementation eines PROFIBUS-Systems auf der Basis von unabhängigen Segmenten ist die anzustrebende Lasttrennung. Prinzipielle Prämisse beim Entwurf des Systems ist jedoch die Zusammenfassung räumlich nahe beieinanderliegender Teilnehmer zu Segmenten unter gleichzeitiger Berücksichtigung des Vernetzungsgrades. Darunter ist die Summe aller vorhandenen Kommunikationsbeziehungen der Teilnehmer untereinander, dividiert durch das theoretisch mögliche Maximum zu verstehen. Darüber hinaus sind die Kommunikationsbeziehungen mit ihrer zu erwartenden Frequenz des Auftretens von Nachrichten zu gewichten. Insgesamt läßt sich damit im Sinne der angestrebten Lasttrennung das zu erwartende Verhältnis von lokalem zu segmentübergreifendem Verkehr bestimmen.

In die Wahl der Anzahl der Teilnehmer pro Segment ist ferner die Höhe der immer vorhandenen Grundlast, verursacht durch Tokenzyklen, einzubeziehen. In engem Zusammenhang mit der Grundlast steht die Priorisierung der Brücken, durch Vergabe von mehr als einer Teilnehmeradresse an diese.

Aufgrund der im Automatisierungsumfeld stark differenzierten Anwendungsfälle müssen die einzubeziehenden Kriterien vom Systemingenieur jeweils individuell analysiert werden.

5.6 Zusammenfassung und Bewertung des Kopplungsansatzes

Mit der Kopplung von autark operierenden PROFIBUS-Segmenten über ein ATM-Netz kann die Kommunikation zwischen verteilt installierten PROFIBUS-Geräten erreicht werden. Bei diesem Kopplungskonzept wird zwischen Intra- und Intersegment-Kommunikation unterschieden. Auch wenn das Hauptziel der Kopplung der Segmente darin liegt, entfernt angeordneten Teilnehmern den Zugriff auf andere PROFIBUS-Teilnehmer zu ermöglichen, bringt das Konzept den positiven Effekt mit sich, durch die Filterung in den Brücken eine Lasttrennung

vorzunehmen. Mittels des erweiterten Adressierungsschemas können darüber hinaus theoretisch wesentliche mehr Teilnehmer an ein Gesamtsystem angeschlossen werden. Im Vergleich zur transparenten Kopplung haben die Brücke hier eine wesentlich größere Komplexität, die sich nicht nur durch die Abwicklung der Filterfunktion, sondern auch in der aktiven Teilnahme am Token-Passing, durch die Verwaltung von Warteschlangen mit unterschiedlicher Priorität und der Vermeidung von Deadlocks begründen läßt. Hinsichtlich der zu erreichenden maximalen Ausdehnung zwischen den Segmenten besteht zum Konzept der transparenten Kopplung kein Unterschied. Die Nebenläufigkeit der Aktionen in den einzelnen PROFIBUS-Segmenten erschwert hier zusammen mit dem sich nachteilig auswirkenden Stop-and-Wait-Prinzip die Erfüllung harter Zeitanforderungen an die Abwicklung von Nachrichtenzyklen. Zur Kompensation müssen als Kompromisse die vorgestellten Lösungsansätze wie Priorisierung der Brücken und das Loslösen vom Stop-and-Wait-Prinzip eingegangen werden. Damit verbunden ist in einigen Punkten die Abkehr vom PROFIBUS-Standard.

Der Gesamtdimension eines PROFIBUS-Systems hinsichtlich anwendungsspezifischer Anforderungen, wie maximal gestattete Systemreaktionszeit und der Nachrichtenrate sind demnach Grenzen gesetzt, die nur teilweise auf die Funktion von ATM als Backbone-Netz zurückzuführen sind.

Das im folgenden Abschnitt diskutierte Praxisbeispiel zeigt die Verwendbarkeit des Konzeptes, wenn bei der Implementation die vorgeschlagenen Anpassungen vorgenommen werden.

5.7 Zusammenschaltung von PROFIBUS-Segmenten am Beispiel der Stellwerkskommunikation

Zur Untermauerung der Ergebnisse soll das in der Motivation kurz vorgestellte Szenario aus der Verkehrstechnik beim Betrieb von Gleisanlagen eines privaten Bahnbetreibers zu ausführlichen Untersuchungen herangezogen werden. Zwei Zielstellungen sind zu verfolgen. Zum einen ist zu prüfen, ob sich eine Zusammenschaltung entsprechend dem Ansatz zur transparenten Kopplung realisieren läßt. Dazu sollen ferner Aussagen getroffen werden, ob Reserven für den zukünftigen Ausbau bestehen. Die zweite Zielstellung ist die Prüfung der Zusammenschaltung als unabhängige Segmente, um Teilnehmer zusammenzufassen und deren Kommunikation über Segmentgrenzen hinweg zu ermöglichen. Gleichzeitig ist das Erreichen einer Lasttrennung durch die Segmentierung angestrebt. Im Hinblick auf zukünftige Erweiterungen der Anlagen muß bezüglich der Adressen ausreichend Spielraum vorhanden sein. Abbildung 76 stellt eine mögliche Netzarchitektur bei Verwendung von Brücken und ATM als Backbone-Netz zur Verbindung der PROFIBUS-Segmente dar. Die Architektur findet bei der Untersuchung beider Kopplungsansätze Verwendung. Die Bediencomputer sind in einem Segment in einer Zentrale zusammengefaßt. Es existiert jeweils ein eigenes Segment für zueinander räumlich nahe Stellwerke.

In jedem Stellwerkssegment sind weitere Bediencomputer angeschlossen, die nur dann benutzt werden, wenn Einstellungen vor Ort vorgenommen werden. Von jedem Bediencomputer in der Zentrale kann auf jedes Stellwerk zugegriffen werden. Alle Bediencomputer verfügen über die gleiche Sichtweise auf die Zustände des Gleissystems, d.h. alle werden von den Stellwerken mit Änderungsmeldungen versorgt.

Drei unabhängige Stellwerkssegmente und ein Segment mit den Bediencomputern bilden das Gesamtsystem. Im Segment A befinden sich 7 Stellwerke, in Segment B 4 und Segment C nur ein Stellwerk. Insgesamt sind 9 Bediencomputer in der Zentrale vorhanden. Die Anwendung

verlangt, daß jede angeschlossene Station Nachrichtenzyklen initiieren können muß, d.h. jeder Teilnehmer ist als Master konfiguriert.

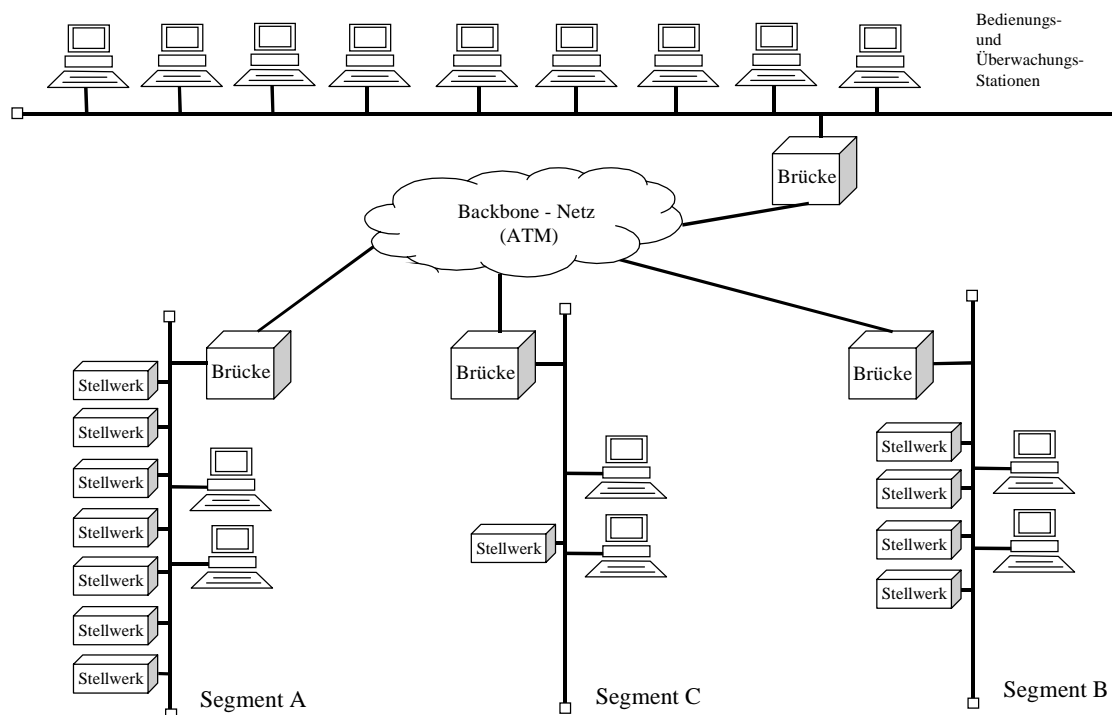


Abbildung 76: Netzstruktur der Stellwerksanlage mit ATM-Kopplung

Von den Bediencomputern aus kann in die Weichenstellung manuell eingegriffen werden. Typischerweise operieren die Stellwerke aber autark entsprechend dem Zugverkehr. Vor und während der Befahrung einer Gleisstrecke senden die Stellwerke Meldungen über den Zuglauf an jeden Bediencomputer aus. Damit wird die Sichtweise auf Zugläufe und Weichenstellungen aktuell gehalten. Die Kommunikationsbeziehungen sind in folgender Weise definiert. In der Anwendungsschicht des PROFIBUS sind für jede Kommunikationsbeziehung eines Stellwerkes drei logische Kanäle auf jeweils einen Dienstzugangspunkt a, b und c bidirektional abgebildet. Jeweils ein Kanal a wird zu den Bedienplätzen unterhalten auf dem die Meldungen und zugehörige Quittungen ausgetauscht werden. Der Kanal b wird ebenfalls zu jedem Bedien-PC unterhalten und ist für Hilfsbedienungen, die vom Bediencomputer ausgelöst werden, vorgesehen. Auf dem Kanal c tauscht jedes Stellwerk, falls erforderlich, Nachrichten mit jeweils zwei Nachbarn aus. Im betrachteten Anwendungsfall werden auf Kanal c keine Nachrichten ausgetauscht. Dieser wird jedoch durch Lebenszeichen überwacht. Alle Kanäle werden laut Anwendung zyklisch mit Lebenszeichen überwacht.

Telegramm	Länge	Intervall
Meldung	32 Byte – 240 Byte	Entsprechend Aufkommen
Lebenszeichen Kanal a	32 Byte	3 s
Lebenszeichen Kanal b	23 Byte	10 s
Lebenszeichen Kanal c	23 Byte	10 s

Tabelle 11: Nachrichten der Stellwerkskommunikation

Die obige Tabelle gibt Aufschluß über die einzelnen auszutauschenden Nachrichten. Hilfsbedienungen sind selten nötig. Deren Telegramme sind deshalb nicht angegeben.

Tabelle 11 beinhaltet zu jeder Meldung die Länge und das Intervall der Aussendung. Bei den Lebenszeichen ist das Sendeintervall konstant mit einem relativ langen Abstand. Meldungen erzeugen die Stellwerke in Abhängigkeit vom Zugverkehr. Der Betreiber der Gleisanlage verlangt, daß das System eine maximale Anzahl von 600 Zugfahrten pro Stunde kommunikationstechnisch bewältigen kann. Pro Zugfahrt entstehen durchschnittlich 80 Meldungen. Jede Meldung erzeugt ein Telegramm mit einer Länge von mindestens 32 Byte. Die Stellwerke verfügen darüber hinaus über die Möglichkeit, bis zu 7 schnell aufeinanderfolgende Meldungen in einem Telegramm zusammenzufassen (Blockung von Meldungen). Die Token-Soll-Umlaufzeit ist mit 50 ms vorgegeben, minT_{SDR} beträgt 450 μs und maxT_{SDR} hat einen Wert von 960 μs . Der PROFIBUS arbeitet mit einer Datenrate von 500 Kbit/s.

Kopplungsvarianten der Stellwerks- / Bediencomputer-Kommunikation

Transparente Kopplung

Die grundsätzliche Frage hierzu ist, ob das Kommunikationssystem in der Lage ist, alle Anforderungen abzuwickeln. An zweiter Stelle steht die Frage nach der maximalen Reaktionszeit. Eine weitere wichtige Frage ist, ob die bisher projektierte Slot-Zeit von 2 ms innerhalb dieses Szenarios noch eingehalten werden kann. Weiter ist von Interesse, welche maximale Anzahl Fahrstraßen das System bewältigen kann.

Abbildung 77 gibt Aufschluß über die Frage nach der Bewältigung des Meldungsaufkommens durch das Kommunikationssystem. Insgesamt ist das System mit transparenter Kopplung in der Lage, die Anforderungen abzuwickeln, wenngleich eine Reihe von Meldungen nicht sofort bei Entstehen abgesendet werden können und so die Reaktionszeit verlängern.

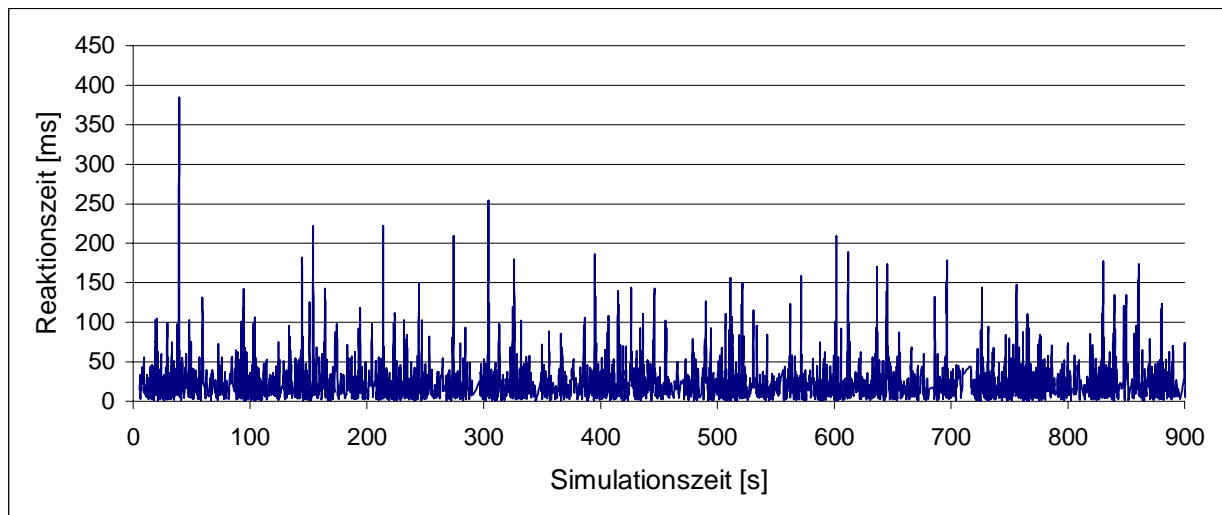


Abbildung 77: Reaktionszeiten bei transparenter Kopplung

Zur Reaktionszeit wird im Simulationsmodell neben der Zeit für den Transfer der Meldungen auch die Dauer des Aufenthaltes in der Warteschlange des Stellwerkes bis zur Absendung gezählt. Als Durchschnitt wurde für die Reaktionszeiten ein Wert von 24,5 ms ermittelt. Es ergeben sich in der Spitze Reaktionszeiten von bis zu 380 ms, obwohl der eigentliche Transfer in nur 2 ms abgewickelt ist. Die Slot-Zeit mußte aufgrund der Übertragung durch das ATM-Netz, wobei der Strom-Modus verwendet wurde, auf 3 ms erhöht werden. Dies liegt

hauptsächlich darin begründet, daß Telegramme mit einer Länge von bis zu 240 Byte bei entsprechender Blockung auftreten können. In weiteren Simulationen wurde für die maximal zu bewältigenden Fahrstraßeneinstellungen ein Wert von etwa 1000 ermittelt. Dies bedeutet, daß noch Reserven vorhanden sind.

Nicht unerwähnt bleiben soll, daß grundsätzlich eine Erhöhung der PROFIBUS-Datenrate die größten Vorteile bringen wird, da die Sendezeit der Telegramme bei einer Datenrate von 500 Kbit/s an der Übertragungsdauer und insgesamt als Beitrag zu den Reaktionszeiten den größten Anteil hat. Konstruktionell bedingt läßt sich jedoch bei den Stellwerken keine höhere Datenrate einstellen.

Lasttrennung durch unabhängige PROFIBUSse

Wendet man auf das in Abbildung 76 dargestellte Szenario das Konzept der Kopplung von unabhängigen PROFIBUS-Segmenten an, so werden etwa 90% des Kommunikationsaufkommens aus Richtung der Stellwerke zu den Bedienplätzen stattfinden. Ergebnis dessen ist eine zu erwartende starke Belastung der zum Segment mit den Bediencomputern gehörenden Brücke. Deren Leistungsfähigkeit bzw. deren Rolle im Buszugriffsverfahren ist als maßgeblich für die Gesamtleistung des Systems anzusehen. Ähnliche große Bedeutung besitzt der Datenverkehr, der durch die Bediencomputer verursacht wird. Dieser kann aber vernachlässigt werden, weil er sich nur aus den relativ seltenen Lebenszeichen zusammensetzt. Für die Übertragung der Meldungen von Stellwerken zu den Bediencomputern ist neben dem Unicast-Prinzip zu jedem Bediencomputer bei entsprechend gesicherter Übertragung auch ein Multicast-Verfahren, abgebildet auf den PROFIBUS-SDN-Dienst, als potentiell anwendbar in Betracht zu ziehen. Eine derartige Kommunikation wird die Stellwerke erheblich entlasten. ATM bietet hierzu durch die Unterstützung von Punkt-zu-Multipunkt-Verbindungen Potential.

Den folgenden Betrachtungen liegt auch die oben beschriebene Systemanordnung zugrunde. Unter der Einbeziehung dieser Konfiguration, von Lastannahmen des Betreibers und den beschriebenen Charakteristiken wurde auf der Basis des entwickelten Kopplungskonzeptes für unabhängige PROFIBUSse ein Simulationsmodell erstellt. Anhand dessen sollen im folgenden die prinzipielle Anwendbarkeit des Ansatzes nachgewiesen, sowie die gewonnenen Erkenntnisse für das untersuchte Umfeld dargestellt werden.

Die als Ergebnisse der Simulationen dargestellten Zahlen haben in ihren absoluten Werten nur nachrangige Bedeutung. Sie besitzen nur einen richtungsweisenden Charakter und dienen hauptsächlich der Veranschaulichung des Vergleichs untersuchter Szenarien. Ein Vergleich mit den erzielten Werten bei der transparenten Kopplung ist nur an wenigen Stellen sinnvoll und wird dort herangezogen.

Bei der Zusammenschaltung entsprechend Abbildung 76 wird von der Einteilung der Segmente entsprechend den lokalen Zusammenhängen ausgegangen. Dies bedeutet, die Stellwerke einer Region jeweils zu einem Segment zusammenzufassen und für die Bediencomputer der Zentrale ein eigenes Segment vorzusehen. Diese Variante kann als einfachster Schritt in Richtung einer beabsichtigten Segmentierung mit Unterstützung durch ein ATM-Backbone angesehen werden. Die Übertragung der Meldungen von den Stellwerken zu den Bediencomputern ist in dieser ersten Variante als Unicast implementiert.

Offensichtlich ist die sehr starke Belastung der Brücke des Segmentes der Bediencomputer aus dem ATM-Netz, weil alle Meldungen über diese Brücke abgewickelt werden müssen. Die Brücke im Bediencomputer-Segment hat im Verhältnis zu den Bediencomputern selbst, den Konkurrenten um den Buszugriff, eine weitaus größere Anzahl von Telegrammen zu versenden. Hier macht sich das Token-Passing-Verfahren mit seiner fehlenden Priorisierung einzel-

ner Teilnehmer als nachteilig bemerkbar. Wenn die Bedienstationen keine Anforderungen abzusenden haben, steht der Brücke zwar fast die gesamte projektierte Token-Umlaufzeit zur Verfügung. Eine eintreffende Anforderung kann aber unter Umständen nicht sofort abgesendet werden, wenn die Brücke das Token z.B. gerade weitergegeben hat. Das Token muß nach Ablauf der Haltezeit zwingend abgegeben werden und passiert beim konventionellen Token-Passing alle aktiven Stationen im Segment, bevor es die Brücke erneut erreicht. Zur Kompensation dessen ist beispielsweise die Vergabe mehrerer PROFIBUS-Adressen an die Brücke, wie im Abschnitt 5.5.1 diskutiert, denkbar. Andererseits kann auch der Einsatz von zwei oder mehr Brücken erfolgen.

Zur Betrachtung der Gesamtleistungsfähigkeit wurde die Kommunikation basierend auf realen Meßwerten des Betreibers nachgebildet. Meldungen, die Überwachung durch Lebenszeichen sowie sporadische Aufrüstungen wurden implementiert. Als Aufrüstungen werden die Anforderungen eines Bediencomputers bezeichnet, die von einem Stellwerk ein komplettes Abbild des aktuellen Status verlangen. Von besonderem Interesse ist die Nachrichtenzykluszeit der Meldungen, die hier den Zeitraum vom Eintreffen der Anforderung in der Schicht 2 des Stellwerks bis zum Eintreffen der entsprechenden Antwort beim Stellwerk umfaßt. Als wichtigste Ergebnisse werden von den Simulationen erwartet, ob das Kommunikationssystem in der Lage ist, das Anforderungsvolumen insgesamt abzuwickeln und wie groß die Zykluszeiten der Meldungen sind.

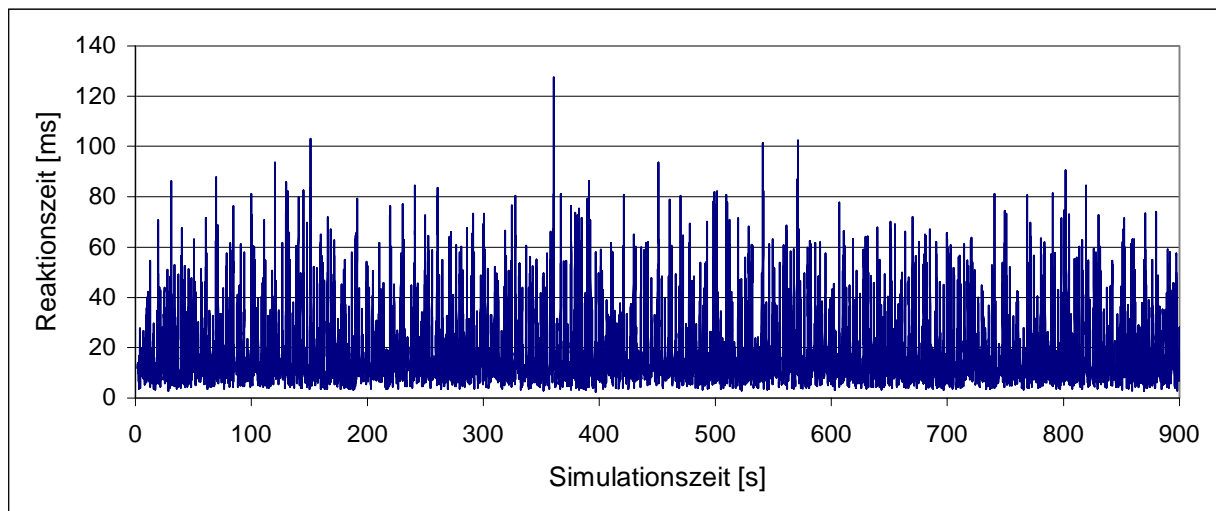


Abbildung 78: Nachrichtenzykluszeit in Segment A

Abbildung 78 zeigt beobachtete Nachrichtenzykluszeiten während der Simulation der Systemanordnung. In der Spitze betragen die Zykluszeiten bis zu 127 ms. Durchschnittlich werden Werte von 19,8 ms erreicht. Die in der Abbildung 78 ersichtlichen Spitzen resultieren aus dem Aufbau der Warteschlange in der Brücke in Spitzenlastsituationen, wie Aufrüstungen oder wenn Anforderungen (Meldungstelegramme) aus den Stellwerkssegmenten gleichzeitig eintreffen. Zur Vermeidung von Deadlock-Situationen, die bei dieser Anwendung entstehen können, wird dem Stellwerk zu jeder Anforderung (bestätigter Dienst) von der lokalen Brücke eine Quittung geschickt, so daß das Stop-and-Wait-Prinzip eines Nachrichtenzyklus außer Kraft gesetzt ist. Infolge dessen können sich mehrere Anforderungen von einem Stellwerke in der Warteschlange der Brücke befinden.

In dem ATM-Netz wurde kein Hintergrundverkehr simuliert, um die Ergebnisse nicht zu verzerren. Die Ursache für die stellenweise sehr langen Reaktionszeiten liegt damit ausschließlich im Zugriffsverfahren des PROFIBUS, das der Brücke nicht genug Zeit läßt alle jeweils anstehenden Nachrichten während einer Tokenhaltezeit abzusetzen. Dadurch wird die durchschnittliche Verweildauer eines Telegramms in der Warteschlange der Brücke verlängert.

Anders stellt sich das Bild im Vergleich mit Abbildung 79 dar. Hier wurden die Nachrichtenzyklen in demselben System betrachtet. Im Unterschied zum vorangegangenen System wurden der Brücke zwei PROFIBUS-Adressen mit konstantem Abstand bezogen auf das Token-Passing zugewiesen. Die Zykluszeiten verringern sich in einer solchen Konfiguration im Durchschnitt auf 17 ms. Dennoch sind auch in Abbildung 79 noch Spitzen bis 125 ms bei der Reaktionszeit zu finden, wenn Aufrüstungen stattfinden.

Die durchschnittliche Verweildauer innerhalb der Warteschlange reduziert sich bei der vorgenommenen Priorisierung der Brücke, welche damit schneller ihre Telegramme absetzen kann. Neben der Vergabe von 2 Adressen an die Brücke ist auch der Einsatz von zwei Brücken mit gleichmäßig verteilter Last denkbar. Prinzipiell können einer Brücke bei entsprechender Implementation auch mehr als 2 Adressen zugeteilt werden.

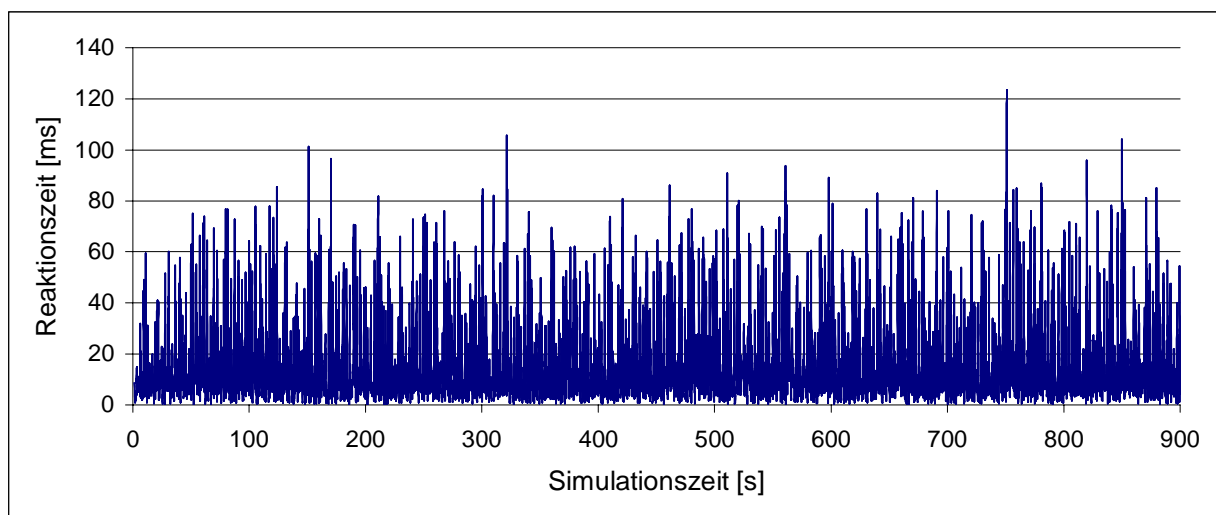


Abbildung 79: Nachrichtenzkluszeit im Segment A (Brücke mit 2 Adressen)

Dies entspricht einer weiteren Priorisierung der Brücke. Dem entgegen stünde aber die im Abschnitt 5.5.1 diskutierte leichte Benachteiligung der anderen Teilnehmer in demselben Segment.

Parallel zu dem im vorangegangenen Abschnitt untersuchten Szenario kommt die Unterteilung des Bediencomputer-Segmentes in Betracht. Die Stellwerks-Segmente behalten ihre Struktur bei. Abbildung 80 zeigt diese Konfiguration.

Die Aufteilung des Bediencomputer-Segmentes erfolgte in jeweils drei gleich große Segmente. In Abbildung 81 sind die Nachrichtenzkluszeiten bei Simulation eines solchen Szenarios dargestellt. Im Verhältnis zu den in Abbildung 78 gezeigten Zykluszeiten ergibt sich hier eine wesentliche Verbesserung, die etwa der durch Vergabe von 2 Adressen an die Brücke entspricht. Abgesehen von einigen Spitzen, welche wiederum Auswirkungen der fehlenden Priorisierung der Brücken sind, bleibt die Zykluszeit bei den meisten Übertragungen unter 50 ms. Die Spitzen reichen nur noch bis zu 80 ms und durchschnittlich ergeben sich 17,4 ms.

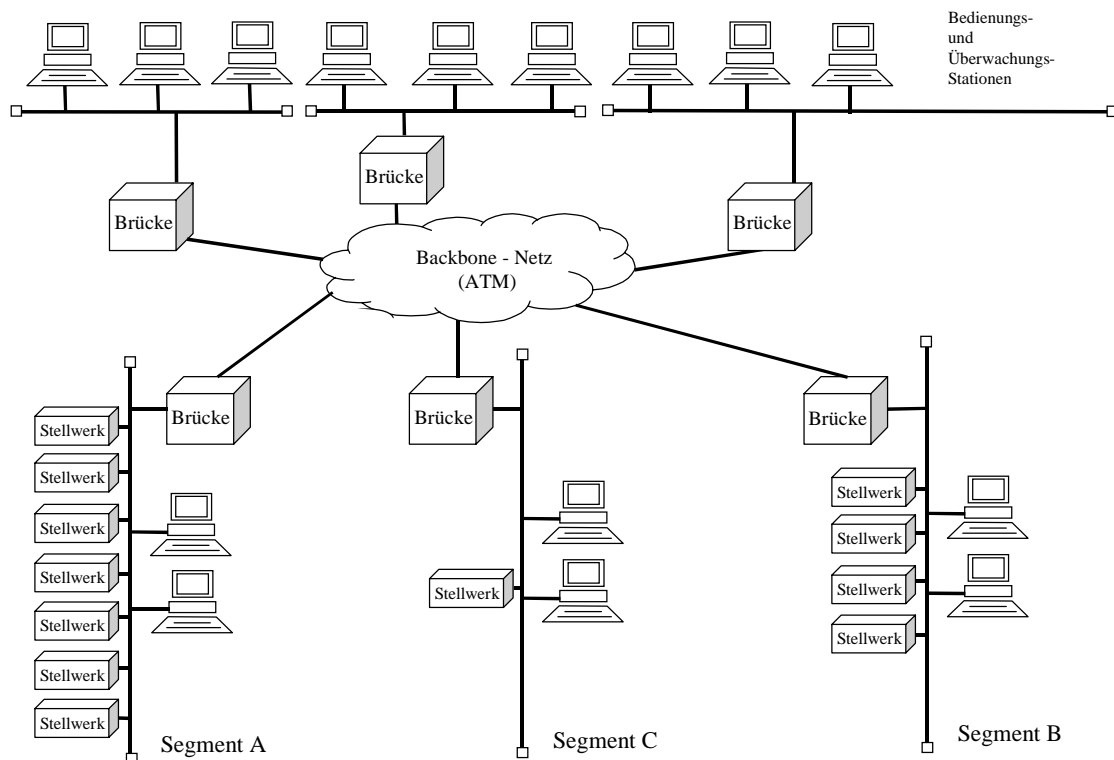


Abbildung 80: Bediencomputer-Segment dreigeteilt

Eine zweite, noch effektivere Variante, die Belastung der Brücke zu reduzieren, besteht in der Reduktion der Anzahl der eintreffenden Nachrichten. In der vorliegenden Konfiguration wurde dazu auf die Versendung der Meldungen im Multicast-Verfahren vom Stellwerk an alle Bediencomputer zurückgegriffen. Dieses Verfahren ist standardkonform und kann deshalb auch hier zum Einsatz kommen.

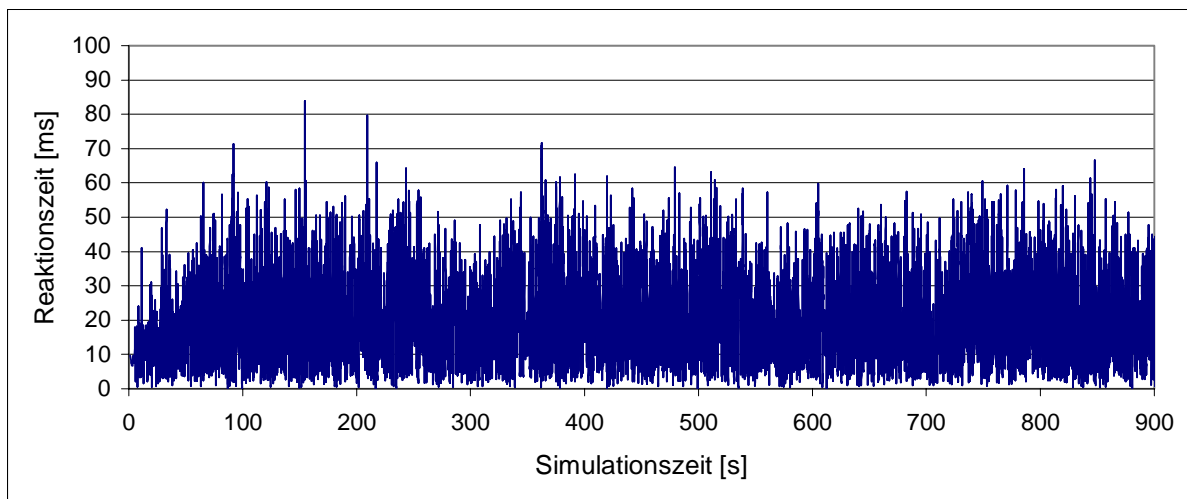


Abbildung 81: Nachrichtenzykluszeit in Segment A bei dreigeteiltem Bediencomputer-Segment

Zu beachten ist jedoch die fehlende Quittung beim Einsatz des SDN-Dienstes in Bezug auf die Übertragungssicherheit. Innerhalb der Anwendungsschicht sind bei der Stellwerkskommunikation solche Sicherheitsmechanismen vorhanden, welche die Nutzung eines unsicheren

Dienstes erlauben. Abbildung 82 zeigt die beobachteten Reaktionszeiten bei Simulation dieser Methode. Es sind deutliche Verbesserungen gegenüber der Unicast-Variante erkennbar, obwohl der Brücke hier nur eine Adresse zugewiesen wurde. Die durchschnittliche Reaktionszeit liegt bei 12,6 ms. Noch weiter verbessern lässt sich die Reaktionszeit, wenn das Multicast-Verfahren noch mit der Priorisierung der Brücke kombiniert wird. Entsprechend reduzieren sich die Reaktionszeiten weiter. Die Mehrzahl der Nachrichtenzyklen wird in Abbildung 83 in weniger als 30 ms abgewickelt. Durchschnittlich wird ein Wert von 10,2 ms erreicht.

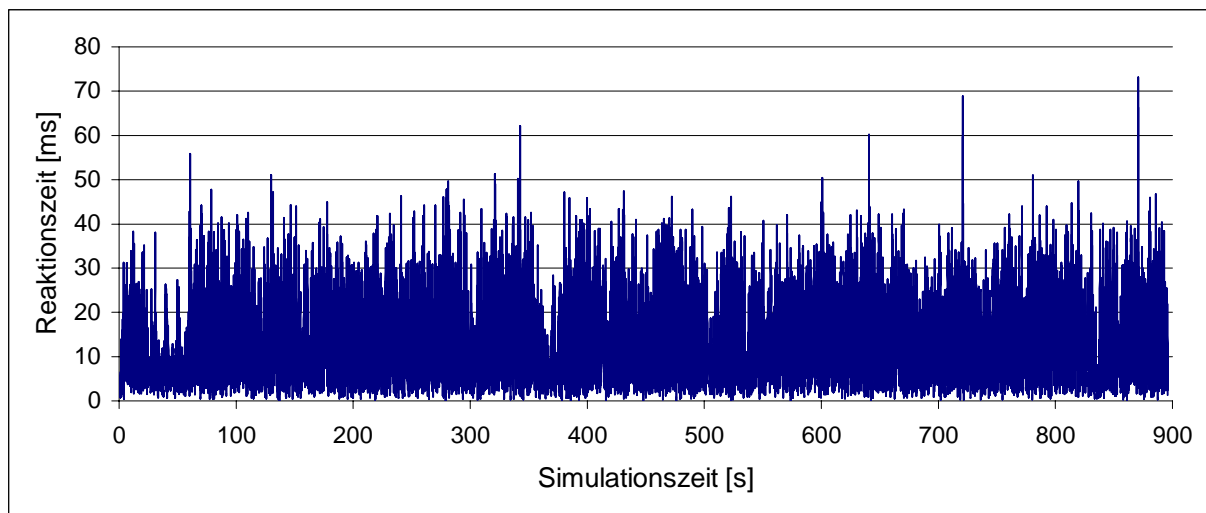


Abbildung 82: Nachrichtenzykluszeit in Segment A bei dreigeteiltem Bediencomputer-Segment (Meldungen als Multicast)

Der Vergabe von zwei Adressen an die Brücke in einem solchen Szenario bringt damit noch einmal leichte Verbesserungen. Replikationen der Telegramme bei der Verwendung von Multicast führen die Brücken der Stellwerk-Segmente oder bei Verwendung von Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen im ATM-Netz die Switches durch.

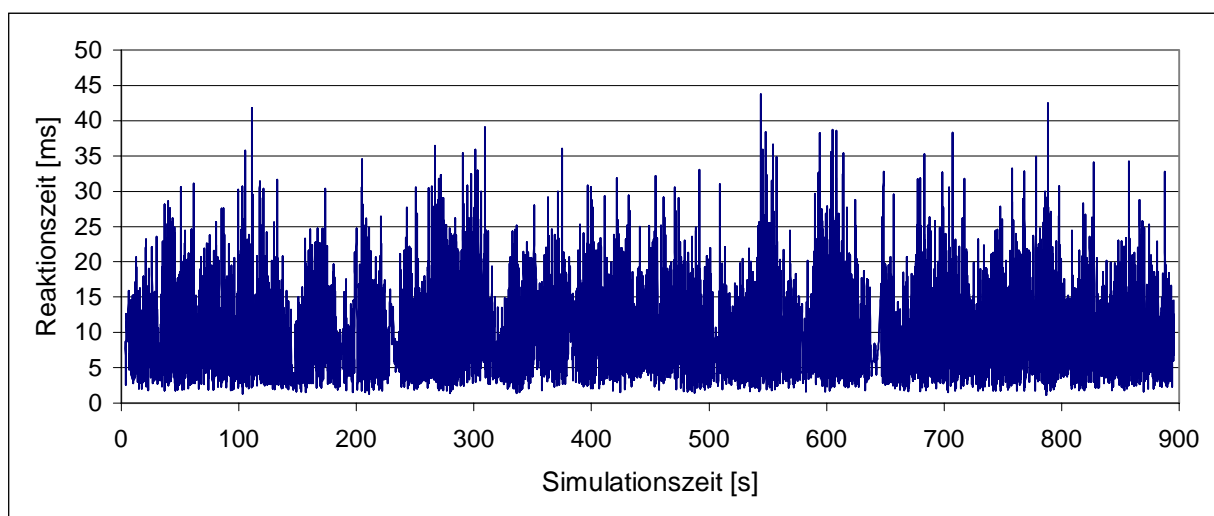


Abbildung 83: Nachrichtenzykluszeit in Segment A bei dreigeteiltem Bediencomputer-Segment (Meldungen als Multicast, Brücken mit 2 Adressen)

Einzelanschlaltung der Bedienplätze an das ATM-Netz

Aus den bisherigen Aussagen, die mit Hilfe der Simulationen gewonnen werden konnten, läßt sich ableiten, daß die optimale Variante der Kopplung für diesen Anwendungsfall im Hinblick auf die Reaktionszeiten unter Verwendung von direkten Verbindungen zwischen den einzelnen Stellwerken und den Bedienplätzen bestehen wird. Wartezeiten beim Buszugriff werden komplett entfallen. Dies entspricht einem Szenario von projektierten 1:1 Verbindungen zwischen Stellwerken und Bediencomputern. Bei Verwendung von Multicast können die bei ATM verwendeten Punkt-zu-Multipunkt-Verbindungen genutzt werden, wodurch die Stellwerke gleichfalls entlastet werden.

Dieser aus der Sicht der Reaktionszeiten optimale Ansatz zieht aber einen erheblichen Administrationsaufwand durch die Verwaltung der Verbindungen nach sich. Gleichzeitig wird das System damit in seiner Flexibilität erheblich eingeschränkt.

Dimensionierungsvorschläge der Teilsegmente

Aus den allgemeinen Betrachtungen des Kopplungsansatzes in Verbindung mit den Simulationsergebnissen lassen sich Schlußfolgerungen für eine möglichst effiziente Ressourcenausnutzung und eine leistungsgerechte Einteilung in Segmente unter gegebenen Anlagenvoraussetzungen gewinnen.

- Prinzipiell ist die Verwendung von Multicast zur Übertragung von Meldungen aus Sicht der Reaktionszeiten als verwendbar einzuschätzen, wenn ein bestätigter Datenaustausch nicht explizit von der Anwendung verlangt wird, oder in der Anwendungsschicht Sicherungsmechanismen vorgesehen sind.
- Grundsätzlich sind zueinander räumlich nahe Teilnehmer zu Segmenten zusammenzufassen.
- Brücken sollten gegenüber anderen Teilnehmern eine höhere Priorität besitzen.
- Ferner ist als Randbedingung die Möglichkeit zur nachträglichen Erweiterung zu berücksichtigen. Hierzu ist die Größe der einzelnen Teilsegmente so zu wählen, daß die nachträgliche Hinzunahme weiterer Stationen in einem Teilsegment nicht zu Überlastung führt.
- Der Konfigurationsaufwand steigt linear mit der Anzahl angeschlossener Segmente.
- Im Rahmen der durchgeführten Simulationen konnte in Bezug auf die Zykluszeiten die Anzahl von 7 Stellwerken im Segment A die gegenüber den Segmenten mit weniger Stellwerken zu erwartende höhere Last als nachteilig ausgewiesen werden.
- Eine Obergrenze bei der Anzahl der Stellwerke pro Segment für eine effiziente Übertragung konnte bei den simulierten Lastverhältnissen mit 10 ausgemacht werden.

Zusammenfassung

Hohe Lasten in einer PROFIBUS-Installation und dezentrale Verteilung der Teilnehmer legen nahe, nach Untersuchung der Kommunikationsbeziehungen der Teilnehmer eine Aufteilung vormals eines einzelnen PROFIBUS in mehrere Segmente vorzunehmen. Entscheidend hierzu ist das Kommunikationsverhalten der Stationen zusammen mit den Kommunikationsbeziehungen untereinander. Anhand der durchgeführten Simulationen konnte nachgewiesen werden, daß die Unterteilung von PROFIBUS-Anwendungen in einzelne autarke Segmente, welche mittels eines ATM-Netzes und entsprechenden Brücken verbunden werden, möglich ist. Leichte Leistungseinbußen, die sich in längeren Reaktionszeiten niederschlagen, müssen dabei in Kauf genommen werden. Besonders geeignet ist das vorgeschlagene Konzept zur Kopplung unabhängiger PROFIBUSse für Anwendungen, die nicht auf eine unmittelbare

Antwort vom Kommunikationspartner Wert legen, sondern marginal längere Reaktionszeiten tolerieren können.

Die Verbindung von PROFIBUS-Segmenten über ATM hat in der vorgestellten Konzeption nur einen zu vernachlässigenden Einfluß auf die Parametrierung der PROFIBUS-Segmente, wenn die bei der Etablierung der ATM-Verbindungen ausgehandelten Dienstgüteanforderungen dauerhaft eingehalten werden.

Eine entscheidende Frage danach, welche Reaktionszeiten ein derartiges PROFIBUS-System liefert, muß differenziert beantwortet werden. Einerseits ist die maximale Lastsituation in den einzelnen Segmenten zu berücksichtigen, andererseits bestimmt das Verhältnis von lokalem zu segmentübergreifendem Verkehr die Leistung des Gesamtnetzes. Es wurde anhand von Simulationsergebnissen herausgestellt, daß die Brücken möglicherweise zu Engpässen werden können. Zur Kompensation können die Reduktion des Telegrammaufkommens durch Verwendung von Multicast, sowie die Vergabe höherer Prioritäten im Token-Passing-Verfahren an die Brücken angewandt werden. Zur Wahl der geeigneten Größe der Segmente wurden vor dem Hintergrund der Stellwerks- / Bediencomputer-Kommunikation Aussagen getroffen. Allgemeine Aussagen dazu sind nur im Kontext der zu erwartenden Last innerhalb der Segmente und des Verhältnisses von Intra- zu Intersegment-Verkehr möglich. Sie müssen im jeweiligen Anwendungskontext getroffen werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Die beschränkte räumliche Ausdehnung von PROFIBUS-Systemen führt häufig zu Segmentierungen und zum Entstehen von autarken Kommunikationsinseln, zwischen denen ein Datenaustausch nicht über den Feldbus möglich ist. Diese Segmentierung zieht einerseits einen erhöhten Administrationsaufwand nach sich und andererseits ist das Zugreifen auf PROFIBUS-Daten aus der Leitebene erschwert und unflexibel. Unter Verwendung der in dieser Arbeit vorgestellten Konzepte zur Verbindung von PROFIBUS-Segmenten über ATM mittels Brücken wird die Überwindung längerer Distanzen als der PROFIBUS-Standard vorsieht durch PROFIBUS-Systeme möglich. ATM qualifiziert sich durch sein ausgefeiltes Konzept, unterschiedliche Dienstgüten zu unterstützen, für die Funktion als Backbone zur Verbindung von PROFIBUS-Segmenten. Die relativ kleinen Dateneinheiten von PROFIBUS lassen sich mit wenig Overhead in die ebenfalls kurzen Nutzlastbereiche von ATM-Zellen abbilden. In den meisten Fällen ist die Übertragung eines PROFIBUS-Telegramms innerhalb einer Zelle möglich. Lediglich wenn Token oder Kurzquittungen in ATM-Zellen transportiert werden, wird ein signifikanter Overhead hervorgerufen. Das für bestätigte Dienste bei PROFIBUS verwendete Stop-and-Wait-Prinzip wurde als nachteilig identifiziert, weil hierdurch die bei der ATM-Kopplung inhärenten Verlängerungen der Übertragungszeiten negativ durchschlagen.

Das erste Kopplungskonzept geht davon aus, die verteilt angeordneten PROFIBUS-Teilnehmer in Teilsegmenten zusammenzuschließen und diese für die PROFIBUS-Geräte transparent über ein ATM-Netz zu verbinden. Charakteristisches Merkmal ist die Tokenübertragung durch das ATM-Netz. Für den PROFIBUS ergeben sich durch die Verbindung über ein ATM-Backbone im Normalfall nur marginal längere Nachrichten- und Tokenzykluszeiten. Die Nachrichtenrate verringert sich leicht bzw. die Systemreaktionszeit erhöht sich demzufolge. Grundsätzlich fließen die Auswirkungen der Kopplung in die Wahl der PROFIBUS-Systemparameter Token-Soll-Umlaufzeit und Slot-Zeit ein. Anhand von Simulationen wurde der Einfluß von Zellverlusten und Hintergrundverkehr im ATM-Netz gezeigt. Die Wahl zur Abbildung der von PROFIBUS geforderten Dienstgüte fällt auf die ATM-Dienstkategorie rtVBR, welche den Anforderungen am besten entgegenkommt.

Im zweiten Konzept werden die verteilten PROFIBUS-Geräte zu eigenständig operierenden PROFIBUSsen zusammengefaßt und diese ebenfalls über Brücken durch ein ATM-Backbone verbunden. Charakteristikum dieses Konzeptes ist das nebenläufige Verhalten der einzelnen PROFIBUSse. Die Unabhängigkeit der Segmente voneinander wird durch die Verwaltung eines Tokens pro Segment erreicht. Daraus folgt, daß in dieser Kopplungsvariante nie ein Token über das ATM-Netz transportiert wird. Gleichzeitig zieht die Unabhängigkeit der Segmente voneinander die Konsequenz nach sich, daß die Transparenz der Kopplung verlorengeht. Die Brücken nehmen hier jedoch, anders als im ersten Konzept, am Token-Passing des

Segmentes teil, dem sie angehören und verfügen damit in der Schicht 2 über eine Master-Funktionalität. Instabilitäten, wie sie im ersten Konzept durch den Verlust von Token auf der ATM-Verbindung hervorgerufen werden können, sind beim Konzept zur Kopplung unabhängiger PROFIBUSse ausgeschlossen. Es ergeben sich jedoch eine Reihe anderer als nachteilig identifizierter Eigenschaften des PROFIBUS, zu deren Überwindung Lösungen erarbeitet wurden. Nachrichtenzyklen können sich dadurch verlängern, daß eine Brücke unter Umständen nicht sofort Telegramme aus entfernten Segmenten auf den PROFIBUS aussenden kann, weil sie auf die Zugriffsberechtigung warten muß. Dem kann erfolgreich entgegengewirkt werden durch eine Priorisierung der Brücken gegenüber den anderen Teilnehmern in demselben Segment, ohne diese signifikant negativ zu beeinflussen. Darüber hinaus kann sich, bedingt durch die Nebenläufigkeit der Prozesse in den Segmenten in einer Brücke eine Warteschlange bei gleichzeitigem Eintreffen von Telegrammen aus verschiedenen Segmenten bilden. Deadlock-Situationen, die bei gegenseitigen, bestätigten Diensten von zwei oder mehr Segmenten in diesem Konzept auftreten können, sind nachteilige Auswirkungen des Stop-and-Wait-Prinzips. Zur Erkennung bzw. zur Vermeidung dieser wurden Mechanismen entwickelt, die mit dem Loslösen vom Stop-and-Wait-Prinzip in Schicht 2 verbunden sind, aber entsprechende Maßnahmen zur Übertragungssicherung in Schicht 7 verlangen. Die Verwendung einer Adreßerweiterung zur Kennzeichnung der Segmentzugehörigkeit von Teilnehmern erlaubt es, die bisher maximale Anzahl von Teilnehmern zu erhöhen. Es wurde im Rahmen der Vorstellung des zweiten Kopplungskonzeptes aber auch ein Verfahren vorgestellt, welches eine Zuordnung von Teilnehmern zu Segmenten ohne Adreßerweiterung bewerkstelligt.

	Transparentes PROFIBUS-Bridging	Kopplung unabhängiger PROFIBUS-Segmente
Erweiterung der Ausdehnung von PROFIBUS-Segmenten	X	X
Nebenläufigkeit der Kommunikation		X
Deadlock-Situationen möglich		X
Flexibleres Management		X
Kopplung vollständig transparent für PROFIBUS Geräte	X	
Brücken sind PROFIBUS Teilnehmer		X
Telegrammfilterung		X
Lasttrennung		X
Erweiterung des Adreßbereiches		X
Warteschlangenverzögerung		X

Tabelle 12: Vergleich der Kopplungsansätze

In Tabelle 12 sind neben der Gemeinsamkeit, die größere räumliche Ausdehnung von PROFIBUS-Systemen zu ermöglichen, die signifikanten Unterschiede der beiden in der vorliegenden Arbeit gegenständlichen Kopplungskonzepte zusammengefaßt. Mit dem Konzept zur Kopplung unabhängiger PROFIBUSse wird eine Lasttrennung erreicht, jedoch kann es zusätzlich zu der durch die Übertragung auf der ATM-Verbindung hervorgerufenen Verzögerung noch zu einer Warteschlangenverzögerung in der jeweils entfernten Brücke kommen. Ein erweiterter Adreßraum mit potentiell mehr anschließbaren Teilnehmern sowie die Möglichkeit zu flexibleren Management-Funktionen zeichnen das zweite Konzept aus.

Ausblick

Mit den in dieser Arbeit vorgestellten Konzepten zur Kopplung von PROFIBUS-Segmenten über ein ATM-Netz wurden die Grundlagen geschaffen, die Kommunikation zwischen verteilt angeordneten PROFIBUS-Geräten über längere Strecken zu ermöglichen. Es wurde anhand von Simulationen gezeigt, daß Teilnehmer aus über ATM gekoppelten PROFIBUS-Segmenten in der Lage sind, Nachrichtenzyklen auch mit harten Zeitanforderungen abzuwickeln.

Folgende weiterführende Arbeiten bieten sich an.

- Das Überwinden des Stop-and-Wait-Prinzips bei bestätigten Diensten muß damit einhergehen, Funktionen zur Sicherung der Übertragung in die Anwendungsschicht zu implementieren. Dazu sind Veränderungen an der Anwendungsschicht oder bei PROFIBUS FMS am Lower-Layer-Interface vorzunehmen. Die Isolation der nötigen Protokollfunktionen und deren Entwurf sind als weiterführende Aufgaben anzusehen.
- Es wurde im Rahmen der Vorstellung des Konzeptes zur Kopplung von unabhängigen PROFIBUS-Segmenten erwähnt, daß die näherungsweise Berechnung der Dauer von Nachrichtenzyklen in einem solchen System aufgrund der Nebenläufigkeit und der stets präsenten speziellen Anwendungsbezogenheit sehr schwierig ist. Eine analytische Untersuchung der Kommunikationsbeziehungen in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsszenario kann helfen, ein Verfahren zu entwickeln, das eine optimale Einstellung der PROFIBUS-Parameter unterstützt. Gleichzeitig können daraus wiederum Rückschlüsse für die Segmentierung der Anlage gezogen werden.
- Mit der Verknüpfung von PROFIBUS-Segmenten über ATM kommt über die Brücken ein breitbandiges Hochgeschwindigkeitsnetz nahe an die zu beobachtenden Prozesse heran. Damit ergibt sich die Möglichkeit, multimediale Dienste, die aus Effizienzgründen nicht in den PROFIBUS implementiert werden können, über dieses breitbandige Netz zu transportieren. In Anwendungen, bei denen eine Echtzeit-Prozeßvisualisierung erforderlich ist, können hierdurch Systemverhalten und Systemzustände akustisch und visuell verfolgt werden. Ferndiagnose und Fernwartung werden somit wesentlich erleichtert. Die Integration von multimedialen Diensten, aufbauend auf dem Konzept zur Kopplung unabhängiger PROFIBUSse, ist eine erstrebenswerte Fortführung der Arbeit.

Anhang A: Simulationsmodelle und -Komponenten

PROFIBUS-Komponenten

PROFIBUS-Geräte und besonders deren Medienzugriffsschicht (FDL) sind die wichtigsten Komponenten in den Simulationsszenarien. Für das Simulationsmodell ist die Schicht 2 (FDL) eines PROFIBUS-Masters implementiert worden. Dasselbe Modul kann auch als Slave verwendet werden, wenn die Teilnehmeradresse außerhalb des Bereichs der für die Master vorgesehenen Stationen gewählt wird. Der Mechanismus des Verwaltens einer Liste der aktiven Stationen (und damit auch der GAP-Mechanismus) wurde dadurch abstrahiert, daß die Adressen der Master in aufsteigender Reihenfolge bis zu einer höchsten Adresse fest vergeben werden. Zentraler Bestandteil eines PROFIBUS-FDL-Moduls ist ein prioritätsgesteuertes Warteschlangenmodul, welches an der Schnittstelle zur Anwendungsschicht eintreffende Anforderungen entgegennimmt. Damit können azyklische und zyklische (Polling) Anforderungen abgebildet werden. Einzelne PROFIBUS-Geräte sowie das Gesamtsystem sind mit den folgenden Parametern konfigurierbar.

Systemweite Parameter:	Token-Soll-Umlaufzeit Slot-Zeit Idle-Zeit PROFIBUS-Datenrate Spitzenzellenrate Link-Kapazität der ATM-Verbindungen Minimale Stationsverzögerung der Responder $\min T_{\text{SDR}}$
Stationsparameter:	Stationsadresse Segmentadresse
Anforderungen aus der Anwendungsschicht:	Zykluszeit der Anforderung Diensttyp Länge des Anforderungstelegramms Länge des Antworttelegramms Zieladresse

PROFIBUS-Datenquellen

Die Schicht 2 der PROFIBUS-Komponenten stellt zur Anwendungsschicht hin eine abstrakte Schnittstelle bereit, die Dienstanforderungen der Anwendungsschicht entgegennimmt und eintreffende Nachrichten dorthin weitergibt. Eine Anwendungsschicht äquivalent zum PROFIBUS-Standard wurde aus Gründen der Abstraktion nicht modelliert. Statt dessen stehen Anforderungsmodule zur Verfügung, mit deren Hilfe Dienste des FDL in Anspruch genommen werden können. Hierzu wurden Module, die einen asynchronen Dienst anfordern sowie Module, die einen zyklischen, dem Polling nachempfundenen, Dienst anfordern, entwickelt. Dies gilt für bestätigte Dienste (SDA, SRD, CSRD). Darüber hinaus ist ein Anforderungsmodul für einen unbestätigten Dienst (SDN) vorhanden.

Brücken

Brückenmodule sind in verschiedenen Ausführungen entwickelt worden, die sich grundsätzlich den zwei in der Arbeit entwickelten Kopplungsansätzen zuordnen lassen. Ein Basismodul

einer Brücke simuliert die Funktionsweise einer Brücke zur transparenten Kopplung. Zwei hiervon abgeleitete Module bilden jeweils den Strom-Modus und den Block-Modus ab. Ein Basismodul mit Filterfunktion zur Kopplung unabhängiger PROFIBUS-Segmente mit der Funktionalität eines Masters wurde entwickelt, von dem wiederum spezialisierte Module abgeleitet wurden. Dies sind Brückenmodule, die mehrere Adressen verwalten können, Module mit der Funktionalität zur Prophylaxe sowie Erkennung und Auflösung von Deadlock-Situationen. Zusätzlich verfügen die Brücken über Scheduling-Mechanismen, um verschiedene Priorisierungsstrategien von Telegrammen aus unterschiedlichen Segmenten abzubilden. Alle Brücken verwenden AAL-5 als Anpassungsschicht. Brücken, die im Strom-Modus arbeiten, übergeben den Pufferinhalt jeweils als eine AAL-SDU zusammen mit einer Sequenznummer der Zelle innerhalb eines Telegramms und den Markierungen SSM, BOM, COM oder EOM.

ATM-Switch

Für die Simulationen verwendet wurden ein 4-Port und ein 16-Port ATM-Switch, deren Schaltverfahren auf einer Busarchitektur beruht. Die modellierten Switches verfügen über keine Eingangspuffer und keine Puffer zur Zwischenpufferung in der Vermittlungskomponente. Um einen Ausgangsport konkurrierende Zellen werden statt dessen in Ausgangswarteschlangen mit definierbarer Kapazität eingestellt. Demzufolge wird diesen Warteschlangen für das Simulationsmodell die größte Aufmerksamkeit zuteil.

Quelle für CBR-Datenstrom

Als Modul, das einen Zellenstrom mit konstanter Rate erzeugt, kann ein Zellengenerator verwendet werden. Dieser Generator erzeugt Zellen nach einer vorgegebenen Zellenrate T [Zellen/s] mit konstantem Abstand $1/T$.

Quelle für VBR-Datenstrom

Zur Modellierung einer Datenquelle, die mit variabler Bitrate sendet, wurde das Modell eines Video Codec verwendet. Dreißig mal pro Sekunde wird von diesem ein Frame generiert. Die Bitrate während eines Frames wird durch folgende Formel bestimmt.

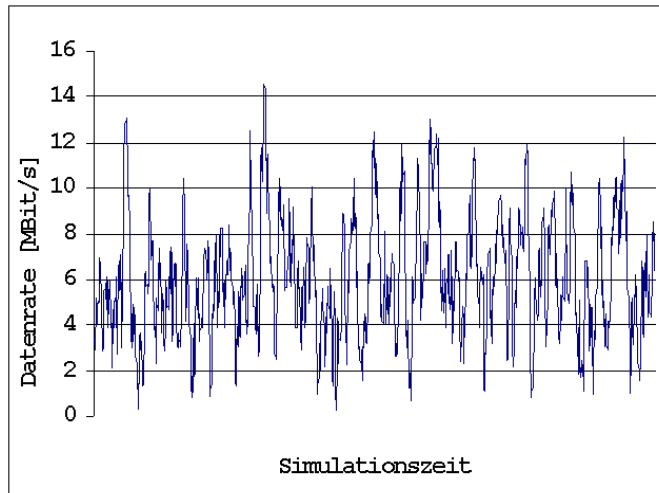
$$Y(n) = 0,8781 * Y(n-1) + 0,213 * W(n) * M$$

$Y(n)$: Datenvolumen des Frames n [Bit]

M : vorgegebene mittlere Bitrate der Datenquelle

$W(n)$ ist eine Gaußsche Zufallsvariable mit einem Mittelwert von 0,572 und einer Varianz von 1. M stellt hierbei die mittlere Bitrate der Video-Datenquelle dar und fließt als externer Parameter in das Modell ein.

Das Modul liefert an seinem Ausgangsport Zellen mit einem Abstand, der sich aus dem reziproken Wert des jeweils erzeugten Datenvolumens pro Frame ergibt. Zur Simulation von Interferenzdatenverkehr (Hintergrundlast) kann dieses Modell einer VBR-Datenquelle eingesetzt werden, um Datenströme mit variabler Zellenrate abzubilden. Mehrere dieser Datenquellen zusammen liefern unkorrelierte variable Datenströme, die geeignet sind, statistisches Multiplexing abzubilden.



Die nebenstehende Abbildung 84 zeigt das von der VBR-Datenquelle erzeugte Datenvolumen, beobachtet über einen Zeitraum von 60 Sekunden. Die eingestellte durchschnittliche Datenrate beträgt 6 Mbit/s. Die Varianz der Datenrate ist 6,78, das Maximum für den betrachteten Zeitraum wurde mit 14,55 und das Minimum mit 0,27 Mbit/s festgestellt

Abbildung 84: Datenrate einer VBR-Datenquelle

Quelle für WWW-Datenstrom

Der Anteil von HTTP-Datenverkehr am Gesamtdatenaufkommen nimmt beständig zu und stellt mittlerweile den größten Anteil dar. Dieser durch Nutzer des WWW generierte Datenverkehr sollte daher auch bei den Simulationen des Interferenzdatenverkehrs Berücksichtigung finden. Der sogenannte Web-basierte Datenverkehr zeichnet sich durch eine Reihe von Besonderheiten aus. In [Deng96] wird dieser ausführlich beschrieben. Typischerweise löst ein Web-Seitenaufruf eine Anforderung an einen Web-Server aus. Dieser erste Aufruf wird gefolgt von einer weiteren Anzahl von Anforderungen an den Webserver, die unter anderem abhängig ist vom Umfang des angeforderten Dokuments und der Anzahl Bilder, welche die Seite beinhaltet. Nach dem vollständigen Übertragen der Seite zum Browser braucht der Nutzer üblicherweise etwas Zeit, um den Inhalt der Seite zu lesen, oder festzustellen, daß der Inhalt nur von geringem Interesse für ihn ist. Diese typische Ablauf einer WWW-Sitzung kann damit in aktive und passive Phasen eingeteilt werden (On-Off-Phasen). Für die Erstellung eines Simulationsmodells für Web-basierten Datenverkehr wird einerseits Kenntnis über die Verteilung von solchen On-Off-Phasen über die Zeit benötigt. Andererseits ist das pro Einzelanforderung übertragene Datenvolumen und das gesamte Datenvolumen eines Dokumentes von Bedeutung. Zur Gewinnung von Erkenntnissen zu letzterem wurden am Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund der TU Braunschweig umfangreiche Messungen zur Bestimmung des Datenvolumens bei der Übertragung von Web-Seiten durchgeführt, die in [NEC98] eingeflossen sind. Beobachtet wurde die HTTP-Kommunikation, die lokale Nutzer mit externen Servern betrieben und die Zugriffe von externen Interessenten auf die Daten des lokalen Web-Servers. Als Ergebnis dessen wurde ermittelt, daß pro Anforderung durchschnittlich 7590 Bytes übertragen wurden. Die durchschnittliche Dokumentgröße betrug 32900 Bytes und 32% aller Übertragungen beinhalteten weniger als 1000 Bytes.

Basierend auf diesen Erkenntnissen und unter Verwendung des in [Deng96] publizierten Modells wurde ein Modul zur Abbildung von HTTP-Datenverkehr mit den folgenden Eigenschaften entwickelt.

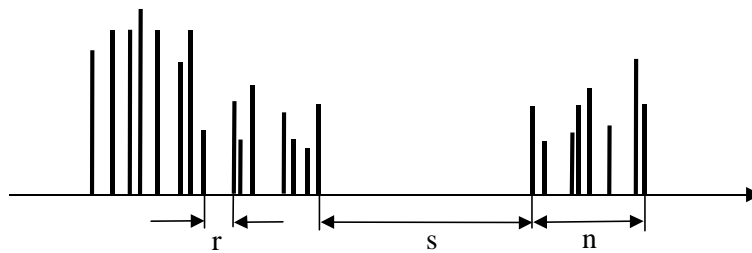


Abbildung 85: On-Off-Modell

Das On-Off-Modell ist durch die Verteilung dreier Zufallsvariablen entsprechend Abbildung 85 gekennzeichnet. Die zeitliche Verteilung der Anforderungen während der On-Phase (r) kann durch eine Weibull-Verteilung mit den Parametern $\theta = e^{4,4}$ und $k = 0,88$ beschrieben werden. Die Dauer der Off-Phasen (s) kann mittels einer Pareto-Verteilung mit den Parametern $\alpha = 0,5$ und $k = 60$ näherungsweise dargestellt werden. Die Dauer der On-Phasen wird in dem Simulationsmodul durch eine Weibull-Verteilung mit den Parametern $\theta = 1,5$ und $k = 0,5$ beschrieben.

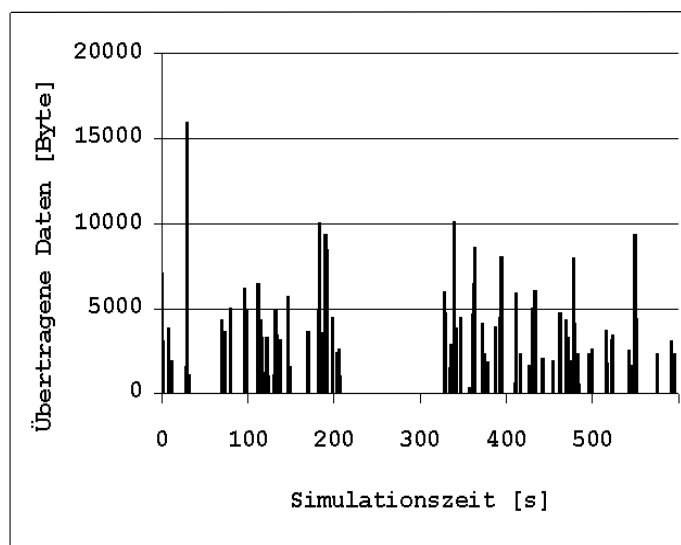


Abbildung 86: HTTP-Datenverkehr

Abbildung 86 zeigt beispielhaft das simulierte Verhalten eines Nutzers des WWW, beobachtet in einem Zeitraum von 10 Minuten. Die einzelnen On- und Off-Phasen sind deutlich zu unterscheiden. Das Auslösen von mehreren aufeinanderfolgenden Anforderungen durch den Browser wird vom Server mit den entsprechenden Daten und unterschiedlichem Volumen beantwortet. Eine längere Off-Phase ist zwischen Sekunde 220 und Sekunde 320 auszumachen.

In [Deng96] wird davon ausgegangen, daß der auf der Basis des Modells generierbare Anforderungsstrom mit einer Pareto-Verteilung der Länge der Off-Phasen mit $\alpha \leq 2$ und einer Weibull-Verteilung des Abstandes zwischen den Anforderungen während der On-Phase mit $k < 1$ den Ansprüchen an einen selbstständigen Datenstrom genügt. Der Hurst-Parameter dafür wird mit 0,9 angegeben.

Anhang B: Übersicht zu Terminologie und Parametern des PROFIBUS

Acknowledgement	Kurzquittung, Bestätigung
Aufruffolgebit	Alternierendes Bit wird in Telegrammen zur Erkennung von Nachrichtenduplizierung und –verlust verwendet
Aufruftelegramm	Request
Auslösezeit - T_{SET}	Auslösezeit, die zwischen dem Eintreten eines Ereignisses bis zur Auslösung der erforderlichen Reaktion beim PROFIBUS-Teilnehmer verstreicht
Bitzeit	Zeit, die beim Senden eines Bit verstreicht. Sie ist reziprok dem Wert der Übertragungsrate.
CSRD	Cyclic Send and Request Data with Reply Übertragungsdienst der Schicht 2 für einen zyklischen Übertragungsdienst mit Datensendung und gleichzeitiger Datenanforderung. Das zyklische Verhalten wird in der Schicht 2 gesteuert.
DP	Decentralized Periphery Ausprägung des PROFIBUS speziell für hohe Datenraten, bei der typischerweise nur ein Master zyklisch Daten an die Slaves sendet oder von diesen abfragt.
FDL	Fieldbus Data Link Schicht 2 des PROFIBUS
FMS	Fieldbus Message Specification Ausprägung der Schicht 7 des PROFIBUS
Frame Control	Kontrollbyte im Telegrammkopf zur Kennzeichnung des Telegrammtyps; Enthält darüber hinaus weitere Steuerinformationen wie Aufruffolgebit und Teilnehmertyp
GAP	Adreßbereich bei aktiven Teilnehmern, der zwischen der eigenen Adresse und der Adresse des nächsten Teilnehmers im logischen Ring liegt. Aktive Teilnehmer prüfen zyklisch diesen Adreßbereich auf Änderungen zur Feststellung neuer Teilnehmer.
Idle Zeit	Ruhezustandszeit Zeit, die beim Initiator nach Empfang des letzten Bits eines Telegramms verstreicht, bis das erste Bit eines neuen Telegramms auf das Medium gesendet wird, oder vom Senden des letzten Bits eines nicht zu quittierenden Telegramms bis zum Senden des ersten Bits des nächsten Telegramms verstreicht.

Initiator	Auslöser eines Nachrichtenzyklus bzw. Sender eines Aufruftelegramms
KBL – Kommunikationsbeziehungsliste	Verzeichnis jedes Teilnehmers über die zu anderen Teilnehmern unterhaltenen Kommunikationsbeziehungen
Kurz-Quittung	Bei Aufrufen, die nur quittiert werden, wird die Kurzquittung als positive Quittung verwendet. Bei Aufrufen, die beantwortet werden, dient die Kurzquittung als negative Quittung, wenn keine Daten verfügbar sind. (auch Acknowledgement)
LAS	List of Active Stations – wird von jedem Master geführt und enthält die Adressen der Stationen, die im Segment als aktiv erkannt wurden.
LLI	Lower Layer Interface- Schnittstelle (Teilschicht) zwischen der Fieldbus Message Specification und der Schicht 2 mit den Aufgaben der Nachbildung der notwendiger Schicht 3 bis 6 Funktionalität und der Abbildung der FMS-Dienste auf die Dienste der Schicht 2
Master	Bezeichnung für ein PROFIBUS-Gerät, das am Token-Passing teilnimmt und Nachrichtenzyklen initiieren darf.
Modulator-Ausklingzeit T_{QUI}	Modulator-Ausklingzeit, die beim Abschalten des Senders berücksichtigt werden muß, wenn sie größer als T_{SDR} ist. T_{SDR} muß entsprechend verlängert werden. Während T_{QUI} muß das Senden und Empfangen von Telegrammen verhindert werden.
Nachrichtenzyklus	Telegrammsequenzen bestehend aus Aufruftelegramm und Antworttelegramm oder Quittung
Objekt-Verzeichnis (OV)	Enthält die Beschreibungen der einzelnen Kommunikationsobjekte des PROFIBUS-Gerätes
PA	Process Automation Ausprägung des PROFIBUS für die Prozeßautomatisierung. Besonderes Merkmal ist die Möglichkeit, die Spannungsversorgung der Teilnehmer über die Zweidraht-Datenleitung vorzunehmen.
Request	Anforderung eines Masters
Response	Bezeichnung für die Reaktion (Telegrammsendung) eines gerufenen Teilnehmers an den rufenden Teilnehmer (Requester)
SDA	Send Data with Acknowledge Übertragungsdienst der Schicht 2 für einen bestätigten Dienst

SDN	Send Data with no Acknowledge Übertragungsdienst der Schicht 2 für einen unbestätigten Dienst
Segment	Bezeichnung für einen PROFIBUS, der sich über mehrere Leitungsabschnitte erstrecken kann, aber für die Teilnehmer eine gemeinsame Broadcast-Domain bildet.
Slave	Bezeichnung für ein passives PROFIBUS-Gerät, das nicht am Token-Passing teilnimmt.
Slot-Zeit	Maximale Zeit, die der Initiator nach Aussendung des letzten Bits eines Aufruftelegramms auf das Eintreffen des ersten Telegrammzeichens der unmittelbaren Quittung oder Antwort wartet, bis eine Aufrufwiederholung ausgelöst wird. Im Falle der Tokenweitergabe wird auf das erste Zeichen eines Telegramms vom Tokenempfänger gewartet.
SRD	Send and Request Data with Reply Übertragungsdienst der Schicht 2 für einen Übertragungsdienst mit Datensendung und gleichzeitiger Datenanforderung.
Station Delay	Protokollbearbeitungszeit eines Teilnehmers, die vom Senden oder Empfang des letzten Bits eines Telegramms bis zum Senden oder Empfang des ersten Bits des folgenden Telegramms in Bezug auf das Übertragungsmedium verstreicht.
Stop-and-Wait	Prinzip des PROFIBUS-Datenaustauschs für bestätigte Dienste bei dem mit der Sendung des nächsten Aufruftelegramms oder der Tokenweitergabe gewartet wird, bis die angeforderten Daten oder eine Kurzquittung eingetroffen sind. Bei Ausbleiben dieser innerhalb einer definierten Zeitspanne (Slot-Zeit) wird eine Übertragungswiederholung ausgelöst.
Target Token Rotation Time (Token-Soll-Umlaufzeit)	Parameter zur Steuerung des Medienzugriffs zwischen den einzelnen aktiven PROFIBUS-Teilnehmern. Als Differenz aus der Token-Soll-Umlaufzeit und der tatsächlichen Umlaufzeit seit dem letzten Erhalt des Tokens bestimmt sich daraus die verfügbare Zeit des Teilnehmers zur Abwicklung von Nachrichtenzyklen (Token-Haltezeit).
Teilnehmer	Allgemeine Bezeichnung für ein aktives oder passives PROFIBUS-Gerät
Telegramm	Bezeichnung für eine PROFIBUS-Dateneinheit auf der Schicht 2
Time-Out-Zeit	Timer zur Überwachung der Busaktivität bzw. der Idle-Time beim aktiven und passiven Teilnehmern Der Timer läuft ab dem Empfang des letzten Bits eines Telegramms bis zum Empfang des er-

	sten Bit seines folgenden Telegramms. Wenn der Idle-Timer die Time-Out Zeit erreicht, gilt der Bus als inaktiv.
Token Passing	Verfahren zur Regelung des Medienzugriffs zwischen den aktiven PROFIBUS-Teilnehmern (Master)
Tokenzyklus	Zeitraum zwischen Absendung des Token-Telegramms an den nächsten aktiven Teilnehmer und dem Beginn der Aussendung eines Telegramms durch den adressierten Teilnehmer
T_{SDI}	Station Delay des Initiators, der einen Aufruf oder ein Token sendet.
$\min T_{SDR} \max T_{SDR}$	kleinste bzw. größte Station Delay der Responder, die quittieren oder antworten.
Virtual Field Device	Repräsentation des Teils des Anwendungsprozesses, der durch die Kommunikation sichtbar und erreichbar ist; beschreibt das Kommunikationsverhalten des Anwendungsprozesses

Abkürzungsverzeichnis:

AAL	ATM Adaption Layer
ABK	Anzeige- und Bedienkomponente
ABR	Available Bit Rate
ALI	Application Layer Interface
ASI	Aktor/Sensor-Interface
ATM	Asynchronous Transfer Mode
B-ISDN	Breitband – ISDN
BLS	Betriebsleitsystem
BOM	Begin of Message
CAN	Contoller Area Network
CBR	Constant Bit Rate
CDV	Cell Delay Variation
CID	Channel Identifier
CLP	Cell Loss Priority
CLR	Cell Loss Ratio
COM	Continuation of Message
CPCS	Common Part Convergence Sublayer
CPS	Common Part Sublayer
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access / Collision Detection
CSRD	Cyclic Send and Request Data with Reply
CTD	Cell Transfer Delay
DA	Destination Address
DP	Decentralized Periphery
ED	End Delimiter
EOM	End of Message
FC	Frame Control
FCS	Frame Check Sequence
FDL	Fieldbus Data Link
FEC	Forward Error Correction
FIFO	First In First Out
FIP	Factory Instrumentation Protocol
FMS	Fieldbus Message Specification
GAP	GAP – Adreßbereich von der eigenen Teilnehmeradresse bis zum Nachfolger bei aktiven Teilnehmern
GCRA	Generic Cell Rate Algorithm
HEC	Header Error Correction
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunication Union
KBL	Kommunikationsbeziehungsliste
Kbps	Kilobit pro Sekunde

KE	Koppelement
LAN	Local Area Network
LANE	LAN Emulation
LAS	List of Active Stations
LE	Length
LEr	Length repeated
LI	Length Indicator
LLI	Lower Layer Interface
LLC	Logical Link Control
LON	Local Operating Network
MAC	Media Access Control
Mbps	Megabits per second
MBS	Maximum Burst Size
MID	Multiplex Identification
NNI	Network Network Interface
OLM	Optical Link Module
OSI	Open Systems Interconnection
OSF	Offset Field
PA	Process Automation
PAD	Padding
PCR	Peak Cell Rate
PDU	Protocol Data Unit
PNK	Prozeßnahe Komponente
PNNI	Private Network Network Interface
PVC	Permanent Virtual Connection
QoS	Quality of Service
RET	Retransmission
RFC	Request for Comments
RSVP	Resource Reservation Protocol
RTP	Real-time Protocol
SA	Source Address
SAR	Segmentation and Reassembly
SC	Single Character
SD	Start Delimiter
SDA	Send Data with Acknowledge
SDN	Send Data with No Acknowledge
SDU	Service Data Unit
SN	Sequence Number
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SRD	Send and Request Data with Reply
SSCS	Service Specific Convergence Sublayer
SSM	Single Segment Message
STF	Start Field
TCP	Transmission Control Protocol
UBR	Unspecified Bit Rate
UNI	User Network Interface
VBR (rt), (nrt)	Variable Bit Rate (real-time) (non real-time)
VC	Virtual Channel
VCi	Virtual Channel Identifier

VFD	Virtual Field Device
VLAN	Virtuelles LAN
VP	Virtual Path
VPI	Virtual Path Identifier
VPN	Virtuelles Privates Netz
WAN	Wide Area Network

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1: Isolierte PROFIBUS-Inseln, nur lokale Bedienung und Überwachung	2
Abbildung 2: Verbundene PROFIBUS-Inseln, zentrale Bedienung und Überwachung.....	3
Abbildung 3: PROFIBUS-Segmente über ATM verbunden	4
Abbildung 4: Hierarchieebenen der Unternehmenskommunikation.....	7
Abbildung 5: Einteilung verschiedener Feldbussysteme nach Zugriffsverfahren	11
Abbildung 7: PROFIBUS im OSI-Referenzmodell	13
Abbildung 8: PROFIBUS Nachrichtenzyklus.....	15
Abbildung 9: PROFIBUS Telegrammformate	20
Abbildung 10: Breitband-ISDN Protokollreferenzmodell	25
Abbildung 12: Format der SAR-PDU bei AAL1	31
Abbildung 13: AAL 3/4 CPCS - Dateneinheit	32
Abbildung 14: AAL 3/4 SAR-PDU	32
Abbildung 15: AAL 5 CPCS Dateneinheit	33
Abbildung 16: Sichtweisen auf die Unternehmenskommunikation	37
Abbildung 17: Internet Protokollwelt in den Ebenen der Unternehmenskommunikation	38
Abbildung 18: PROFIBUS-Ethernet-Brücke.....	39
Abbildung 19: PROFIBUS-Anwendungsschicht über TCP/IP und Ethernet.....	39
Abbildung 20: Möglichkeiten der Kopplung von Feldbussen und ATM.....	46
Abbildung 21: PROFIBUS Telegramm als AAL-Nutzdaten.....	47
Abbildung 22: Variante der Kopplung auf Schicht 7.....	48
Abbildung 23: PROFIBUS-Komponenten als ATM-Endgeräte	49
Abbildung 24: Schematischer Aufbau einer PROFIBUS-ATM Brücke	51
Abbildung 25: Koppelement zum Übergang auf IP	52
Abbildung 26: Punkt-zu-Punkt ATM-Verbindungen zwischen den PROFIBUS-Segmenten	53
Abbildung 27: Punkt-zu-Mehrpunkt ATM-Verbindung zwischen den PROFIBUS-Segmenten	53
Abbildung 28: Beispiel eines virtuellen PROFIBUS mit zwei Segmenten.....	55
Abbildung 29: Beispiel eines virtuellen PROFIBUS mit vier Segmenten	55
Abbildung 30: Verbindung unabhängig operierender PROFIBUSse	56
Abbildung 31: Tokenzyklus.....	57
Abbildung 30: Nachrichtenzyklus mit Kurzquittung	57
Abbildung 33: Nachrichtenzyklus mit Datenanforderung	58
Abbildung 32: Zellenverlust in einem Teilsegment.....	65
Abbildung 33: Übertragungswiederholung durch die Brücken	66
Abbildung 34: Aufrufwiederholung trifft nach Antwort von S4 ein	66
Abbildung 35: Zellenübertragung im Block-Modus	68
Abbildung 36: Arbeitsweise des Block-Modus bei Empfang vom PROFIBUS (links) und Senden auf PROFIBUS (rechts)	68
Abbildung 37: Zellenübertragung im Strom-Modus.....	69
Abbildung 38: Arbeitsweise des Strom-Modus bei Empfang vom PROFIBUS (links) und Senden auf PROFIBUS (rechts)	70
Abbildung 39: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Bridge (1)	74
Abbildung 40: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Bridge (2)	74
Abbildung 41: Protokollautomat der transparenten Brücke.....	75
Abbildung 42: Teilautomat zur Verbindungsverwaltung.....	75
Abbildung 43: Hintergrundlast und verschiedene Distanzen zwischen den Segmenten.....	76
Abbildung 44: Teilkomponenten von BONEs Designer und deren Verwendung.....	82
Abbildung 45: Zusammenwirken von Modulen und Bibliotheken bei BONEs Designer	82
Abbildung 46: Blockdiagramm eines Simulationsszenarios.....	83
Abbildung 47: Basissystem zur Simulation	84
Abbildung 48: Reaktionszeit bei einer Zellverlustrate von 10^{-1}	85
Abbildung 49: Reaktionszeit bei einer Zellverlustrate von 10^{-3}	86
Abbildung 50: Erweitertes Basissystem mit simuliertem Hintergrundverkehr.....	88
Abbildung 51: Warteschlangenlänge bei Simulation mit Hintergrundlast	89
Abbildung 52: Transferdauer für Token bei Hintergrundlast	90

Abbildung 53: Transferdauer für Token bei Hintergrundlast (Ausschnitt vergrößert aus Abbildung 52)	90
Abbildung 54: Transferdauer für Telegramme bei Hintergrundlast	91
Abbildung 55: Transferdauer für Telegramme bei Hintergrundlast (Ausschnitt vergrößert aus Abbildung 54)	91
Abbildung 56: Füllstand der Warteschlange (Kapazität 500 Zellen)	92
Abbildung 57: Transferdauer für Token	93
Abbildung 58: Transferdauer für Telegramme	93
Abbildung 59: Nachrichtenrate in Abhängigkeit von der Telegrammlänge	97
Abbildung 60: Nachrichtenrate bei fester Datenrate	98
Abbildung 61: Systemreaktionszeit in Abhängigkeit von der Telegrammlänge	99
Abbildung 62: Nachrichtenrate in Abhängigkeit von der ATM-Datenrate	99
Abbildung 63: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Brücke mit Filterfunktion (1)	104
Abbildung 64: Architektur einer PROFIBUS-ATM-Brücke mit Filterfunktion (2)	104
Abbildung 65: Automat einer Brücke mit Filterfunktion	105
Abbildung 66: Eintreffen von Anforderungen aus verschiedenen Segmenten	106
Abbildung 67: Sendeverhalten eines Masters nach Stop-and-Wait-Prinzip	106
Abbildung 68: PROFIBUS Adreßerweiterung zur Vergabe von Segmentadressen	109
Abbildung 69: Zuordnung von Adreßbereichen zu Segmenten	110
Abbildung 70: Brücke schickt Bestätigung an den Initiator	113
Abbildung 71: Entstehen einer Deadlock-Situation	113
Abbildung 72: Zyklische Deadlock-Situation	114
Abbildung 73: Vermeidung von Deadlock-Situationen (1)	114
Abbildung 74: Vermeidung von Deadlock-Situationen (2)	115
Abbildung 75: Erkennen von Deadlock-Situationen	116
Abbildung 76: Netzstruktur der Stellwerksanlage mit ATM-Kopplung	121
Abbildung 77: Reaktionszeiten bei transparenter Kopplung	122
Abbildung 78: Nachrichtenzykluszeit in Segment A	124
Abbildung 79: Nachrichtenzykluszeit im Segment A (Brücke mit 2 Adressen)	125
Abbildung 80: Bediencomputer-Segment dreigeteilt	126
Abbildung 81: Nachrichtenzykluszeit in Segment A bei dreigeteiltem Bediencomputer-Segment	126
Abbildung 82: Nachrichtenzykluszeit in Segment A bei dreigeteiltem Bediencomputer-Segment (Meldungen als Multicast)	127
Abbildung 83: Nachrichtenzykluszeit in Segment A bei dreigeteiltem Bediencomputer-Segment (Meldungen als Multicast, Brücken mit 2 Adressen)	127
Abbildung 84: Datenrate einer VBR-Datenquelle	137
Abbildung 85: On-Off-Modell	138
Abbildung 86: HTTP-Datenverkehr	138

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zeitparameter der PROFIBUS-Geräte	17
Tabelle 2: Verkehrskategorien (nach ATM-Forum Definition).....	28
Tabelle 3: Parameter der Dienstqualität.....	29
Tabelle 4: ATM-Dienstklassen (nach ITU-T Definition).....	30
Tabelle 5: Kriterien des Kommunikationsverhaltens von PROFIBUS.....	59
Tabelle 6: Einfluß der Zellverlustrate auf die Token- und Telgrammübertragung.....	87
Tabelle 7: Übertragungswiederholungen in Abhängigkeit von der Zellverlustrate.....	87
Tabelle 8: Gegenüberstellung Blockmodus und Strom-Modus.....	97
Tabelle 9: Einflußfaktoren auf die Reaktionszeiten	100
Tabelle 10: Reaktionszeiten der Nachrichten bei Priorisierung der Brücke.....	111
Tabelle 11: Nachrichten der Stellwerkskommunikation	121
Tabelle 12: Vergleich der Kopplungsansätze	132

Literaturverzeichnis:

- [Almu99] Almus, Herbert; Hammerschmidt, Christoph:
ATM-Switches im Vergleich, Gateway 3/99 S. 76-80
- [ArEp97] Arnold, M.; Epple, U.; Polke, M.:
Unternehmensweiter Zugriff auf Prozeßinformationen mit dem PLT-Internet,
Automatisierungstechnische Praxis 1/97
- [Bada94] Badach, A.; Hoffmann, E.; Knaur, O.:
High Speed Internetworking, Addison-Wesley, 1994
- [Bend93] Bender, Klaus (Hrsg):
PROFIBUS, Prentice Hall, 1993
- [Blac95] Black Uyles:
ATM: Foundation for Broadband Networks, Prentice Hall, 1995
- [Bonf92] Bonfig, Karl Walter:
Feldbus-Systeme,
Expert-Verlag, 1995, 2. Auflage
- [Boro98] Borowka, Petra:
Brücken, Router: Wege zum strukturierten Netzwerk
Internat. Thomson Publ., Bonn 1998
- [Bors92] Borst, Walter:
Der Feldbus in der Maschinen- und Anlagentechnik, Franzis, 1992
- [Brau99] Braun, Torsten:
IPnG – Neue Internet-Dienste und Virtuelle Netze
dpunkt.Verlag, 1999
- [Buss96] Busse, Robert:
Feldbussysteme im Vergleich, Pflaum Verlag München, 1996
- [Cade96a] Cadence Design Systems
BONeS Designer – Modeling Guide, 1996
- [Cade96b] Cadence Design Systems
BONeS Designer – Users Guide, 1996
- [Cena97] Cena, Gianluca; Demartini, Claudio; Valenzano, Adriano:
On the performances of two popular fieldbuses,
Proceedings of WFCS '97, S.177-186, Barcelona, Oktober 1997

- [Come93] Comer, Douglas E:
Internetworking with TCP/IP, Volume I,
Prentice Hall, 1993
- [Coov97] Coover, Edwin R.:
ATM Switches,
Artech House, 1997
- [Deng96] Deng, Shuang:
Empirical Model of WWW Document Arrivals at Access Link,
Proceedings of IEEE ICC'96, Dallas, June 1996
- [DFAM94] Deutsche Forschungsgemeinschaft für die Anwendung der Mikroelektronik
e.V.: Sensorbusse für den Maschinen und Anlagenbau,
Forschungsbericht Nr. 1/94
- [DIN19245] DIN 19245, PROFIBUS Process Fieldbus, Deutsche Norm, Teile 1,2,3, 1991
- [Ditt97] Dittrich, Jens; von Thienen, Uwe:
VLANs – Migration zu modernen Netzwerken,
Hüthig, 1997
- [Elna92] Elnakhal, Abd Elraham:
Lokale Rechnernetze für die industrielle Automation,
Verlag Dr. Kovac, 1992
- [EN50170] EN 50170 – European International Fieldbus Standard, 1996
- [Fied91] Fiedler, Karsten:
Zeitverhaltensanalyse serieller Bussysteme,
Dissertation, Universität Magdeburg, 1991
- [Früh97] Früh, K. F.:
Handbuch der Prozeßautomatisierung,
Oldenbourg 1997
- [Funk92] Funke, Axel:
Machbarkeitsanalyse von Feldbusanwendungen,
Dissertation, Universität Karlsruhe, 1992
- [Furr98] Furrer, Frank J.:
Ethernet-TCP/IP für die Industrieautomation,
Hüthig, Heidelberg, 1998
- [Grif95] Griffith, John M.:
ISDN, Worldwide Network Applications Technology, Wiley-Verlag, 1995

- [Hein96] Heinrichs, Bernd:
Multimedia im Netz,
Springer-Verlag, 1996
- [Herg99] Hergehan, Andre; Weiler, Christoph; Rosenstiel, Wolfgang:
Internet-basierte eingebettete Systeme in der industriellen Automation,
Automatisierungstechnik 7/99
- [Hoye94] Hoyer, Robert:
Leistungsanalyse von Feldbussystemen im Hochlastbereich,
Dissertation, Universität Magdeburg, 1994
- [ISO11519-1] ISO International Standard,
Road Vehicles- Low Speed serial data communication,
First Edition, 1994
- [John96] Johnson, Howard W.:
Fast Ethernet, Prentice Hall, 1996
- [Kall99] Kalla, Horst:
Steuerungskonzept auf Basis von Ethernet-TCP/IP und CANopen,
Elektrotechnik für die Automatisierungstechnik 8/99 S. 12-14
- [Kief95] Kiefer, Jörg:
Methodische Partitionierung und Parametrierung von Feldbussen,
Dissertation, TU Braunschweig, 1995
- [Kleh96] Klehmet, Ulrich:
Mathematisch-heuristische Leistungsbewertung des Medienzugangsverfahrens beim PROFIBUS, Automatisierungstechnik 3/96, S. 108-118
- [Klou98] Kloust, Heinz:
Ausgewählte Kenngrößen für Automatisierungsanlagen,
VDE-Schriftenreihe, 1998
- [Krie98] Kriese, Werner:
Bustechnologien für die Automation: Vernetzung, Auswahl und Anwendung
von Kommunikationssystemen, Huethig, Heidelberg, 1998
- [Kune97a] Kunert, Oliver:
Interworking field buses through ATM – two basic approaches,
Proceedings of 2nd IEEE Workshop on Factory Communication Systems
1997, Barcelona, Spain, 1-3 Oct. 1997
- [Kune97b] Kunert, Oliver; Zitterbart, Martina:
Interworking fieldbuses through ATM,
Proceedings of 22nd International Conference on Local Area Networks,
Minneapolis, Nov. 1997

- [Kune98] Kunert, Oliver:
Performance aspects of PROFIBUS segments interconnected through ATM,
Symposium on Broadband European Networks '98 - SYBEN '98, Zurich,
May 1998
- [KuTh99] Kurz, Thorsten; Thiran, Patrick; Le Boudec, Jean-Yves:
Regulation of a Connection Admission Control Algorithm,
Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications INFOCOM
'99, New York, March 1999
- [Kyas98] Kyas, Othmar:
ATM-Netzwerke,
Thomson Publishing - DATACOM, 1998
- [LANE95] ATM-Forum:
LAN Emulation over ATM (Version 1.0), ATM Forum 1995
- [LANE97] ATM-Forum:
LAN Emulation over ATM (Version 2.0), ATM Forum 1997
- [LiSu98] Lin, George C; Suda, Tatsuya:
On the impact of long-range dependent traffic in Dimensioning ATM net-
work buffers, Proceedings of IEEE Infocom '98, March 1998
- [Mamm97] Mammeri, Z.; Haouam, K.-D.:
Connection Allocation Schemes for Guaranteeing Hard Real-Time Commu-
nication With ATM Networking
Proceedings of WFCS '97, S. 203-212, Barcelona, Oktober 1997
- [MeMe97] Meier, Uwe; Meinhardt, Stefan:
Topologievergleich serieller Feldbusse bei hoher Übertragungsrate,
atp Automatisierungstechnische Praxis 4/99, S. 44-47
- [NEC98] Griffoul, F.; Harbaum, T.; Röthig, J.; Stüttgen, H; Schaller, S.; Zitterbart, M.:
Layer 4+ Switching With QoS Support,
NEC Technical Report, C&C Research Laboratories, Heidelberg, 1998
- [Neum99] Neumann, Peter:
Feldbustechneik als Motor der Automatisierungstechnik,
atp Automatisierungstechnische Praxis 7/99, S. 27-33
- [Pfei92] Tilo Pfeiffer (Hrsg):
PROFIBUS, VDI Verlag, 1992
- [Phoe98] Phoenix Contact (Hrsg):
Grundkurs Sensor/Aktor-Feldbustechneik
Vogel, Würzburg 1998

- [PNO99] PROFIBUS Nutzerorganisation, Technical Committee 2, Working Group 7
PROFIBUS & Ethernet – Open Integration
Press Release, August 1999
- [Prof99] PROFIBUS User Group
www.profibus.com/data/press.html
- [PNNI] The ATM Forum Technical Committee;
Private Network-Network Interface Specification Version 1.0, 1996
- [Popp97] Popp, Manfred:
The Rapid Way to PROFIBUS DP,
Publikation der PROFIBUS Nutzerorganisation, 1997
- [Prit99] Pritzsche, Kai N.; Sommer, Raimund:
Ethernet, wie wichtig wird dieser Standard für die Automatisierung?
MSR (Messen, Steuern, Regeln) -Magazin 4/99, S.82-83
- [RaWa97] Rathgeb, Erwin; Wallmeier, Eugen:
ATM – Infrastruktur für die Hochleistungskommunikation, Springer, 1997
- [Reis98] Reißeweber, Bernd:
Feldbussysteme,
Oldenbourg, 1998
- [RFC1331] Simpson, W.:
The Point-to-Point Protocol, 1992
- [RFC1483] Heinanen, J.:
Multiprotocol Encapsulation over ATM Adaption Layer 5, 1993
- [RFC1577] Laubach, M.:
Classical IP and ARP over ATM, 1994
- [RFC1619] Simpson, W. :
PPP over Sonet/SDH; 1995
- [RFC1626] Atkinson, R.:
Default IP MTU for use over ATM AAL5, 1994
- [RFC1633] Braden, R.; Clark, D.; Shenker, S.:
Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview, 1994
- [RFC1755] Perez, M.; Liaw, F.; Mankin, A.; Hoffman, E.; Grossman, D.; Malis, A.:
ATM Signaling Support for IP over ATM, February 1995,
- [RFC1889] Schulzrinne, H.; Casner, S.; Frederick, R.; Jacobson, V.:
RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications, 1996

- [RFC1932] Cole, R.; Shur, D.; Villamizar, C.:
IP over ATM: A Framework Document, 1996
- [RFC2205] Brade, R.; Zhang, L.; Berson, S.; Herzog, S.; Jamin, S.:
Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1, Functional Specification, 1997
- [RFC2022] Armitage, G.:
Support for Multicast over UNI 3.0/3.1 based ATM Networks, 1996
- [RFC2215] Shenker, S.; Wroclawski, J.:
General Characterization Parameters for Integrated Services Network Elements, 1997
- [RFC2379] Berger, L.:
RSVP over ATM Implementation Guidelines, 1998
- [RFC2475] Blake, S.; Black, D.; Carlson, M.; Davies, E.; Wang, Z.; Weiss, W.:
An Architecture for Differentiated Services, 1998
- [ReLe94] Rembold, Ulrich; Levi, Pau:
Realzeitsysteme zur Prozeßautomatisierung, Hanser Studienbücher, 1994
- [Schn99] Schnell, Gerhard (Hrsg.):
Bussysteme in der Automatisierungstechnik, Grundlagen und Systeme der industriellen Kommunikation; Vieweg, Braunschweig, 1999
- [Schu99] Schule, Hans:
Prozeßleittechnik im Informationsverbund des Unternehmens
atp Automatisierungstechnische Praxis 2/99, S. 26-37
- [Seem96] Seemann, Günther:
Entwurfs- und Inbetriebnahmestrategie für verteilte Feldbus-Anwendungen
Dissertation, RWTH Aachen, 1996
- [SeRe97] Sexton, Mike; Reid, Andy:
Broadband Networking, Artech House, Norwood 1997
- [Sieg97] Siegmund, Gerd:
Die ATM-Technik, Grundlagen, Netze, Schnittstellen, Protokolle,
Hüthig, 1997
- [Siem] Interaktiver Produktkatalog der Siemens AG,
www3.ad.siemens.de/ca01online
- [Soft99] Softing GmbH; www.softing.com
Produktbeschreibung PROFI-Gate, PROFIBUS-Ethernet-Gateway

- [Solv96] Solvie, Michael:
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen, Dissertation, Hanser Verlag, München, 1996
- [StEk98] Stipidis, E.; Ekiz, H.; Papadoglou, N.; Powner, E.T.:
Performance Analysis of a CAN/ATM LAN-Bridge with various Topologies using SAE Benchmark
- [Swal98] Swales, Andy:
Industrial Internets – Enabling Transparent Factories,
Presented at National Manufacturing Week, Chicago March 1998
- [Tane92] Tanenbaum, Andrew S.:
Computernetzwerke, Prentice Hall, New York 1998
- [Tane95] Tanenbaum, Andrew S.:
Verteilte Betriebssysteme, Prentice Hall, 1995
- [TaDr98] Tauchnitz, Thomas; Drahten, Hasso:
Prozeßleittechnik der Zukunft, Anforderungen, Technik, Wirtschaftlichkeit, atp Automatisierungstechnische Praxis, 3/98, S. 19-29
- [TM40] ATM Traffic Management Specification Version 4.0, ATM Forum 1996
- [UNI94] ATM User Network Interface Specification Version 3.1, ATM Forum 1994
- [UNI96] ATM User Network Interface, Signaling Specification 4.0, ATM-Forum 1996
- [Wehr98] Wehres, Volker:
Wirtschaftliche und technische Auswirkungen digitaler Feldbustechnik auf die Prozeßleittechnik, atp Automatisierungstechnische Praxis 3/98 S. 30-39
- [Wen98] Wen, Chih-Cha; Jiau, Jin-Chyang; Yang, Chorong-Horng:
Design of a Real-Time QoS Management in ATM-Networks,
Proceedings of International Conference on Communications '98, ICC 1998, Atlanta
- [WiZi99] Wittmann, Ralph; Zitterbart, Martina:
Multicast
Dpunkt-Verlag, 1999
- [WuCh99] Wu, Depeng; Chao, H. Jonathan:
Efficient Bandwidth Allocation and Call Admission Control for VBR Service Using UPC Parameters,
Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications, INFOCOM '99, New York, March 1999

- [Zitt95] Zitterbart, Martina; Braun, Torsten.:
Hochleistungskommunikation, Band 1 und 2, Oldenbourg, 1995
- [ZiSc95] Zitterbart, Martina; Schmidt, Claudia:
Internetworking – Brücken, Router und Co.
Internat. Thomson Publishing, 1995